



Comunicações Tácticas e de Emergência por propagação por efeito *NVIS*

Renato Gonçalves Rocha

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Professor Doutor Fernando Duarte Nunes

Orientador: Professor Doutor António Carlos de Campos Simões Baptista

Co-Orientador: Professora Doutora Maria João Marques Martins

Co-Orientador externo: Engenheiro Mariano José Ferreira Gonçalves (EID)

Vogal: Professor Doutor António Luís C. da Silva Topa

Setembro 2013

Agradecimentos

O caminho mais difícil está a chegar ao fim...

Depois de sete longos anos, que ao mesmo tempo parece que voaram, eis que chega a altura do expoente máximo, o final do curso de Engenharia Electrotécnica na Academia Militar.

Quero agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor António Baptista e à Professora Doutora Maria João M. Martins, pela disponibilidade sempre prestada.

Quero agradecer ao Eng.º Mariano Gonçalves, por todo o interesse e confiança que depositou em mim, por todo o conhecimento transmitido, e acima de tudo pela amizade que se criou entre nós.

Quero agradecer ao Director do Curso de Transmissões da Academia Militar Tenente-Coronel Engenheiro João Bastos Rocha pelo apoio e preocupação mostrados.

Quero agradecer à empresa EID nomeadamente ao Eng.º Fernando Pimenta e ao Eng.º Mário Guerra por toda a disponibilidade manifestada no apoio à construção da antena e também no que diz respeito à cedência de material para esta e ao equipamento para se efectuarem os ensaios.

Quero agradecer ao Corpo de Fuzileiros de Alfeite, nomeadamente ao 1º Sargento Escaleira por ter envidado esforços no sentido de obter as antenas necessárias para os ensaios.

Quero agradecer a alguns dos meus camaradas de curso da Academia Militar, pelos anos passados lado-a-lado e pelo apoio e companhia prestados.

Quero agradecer à Estefânia por ter estado a meu lado durante o último ano.

Por fim, quero em simultâneo, agradecer e dedicar este trabalho aos meus pais, Joaquim Silva Rocha e Maria das Dores da Silva Gonçalves Rocha, por sempre acreditarem em mim, pelo apoio, carinho, educação, motivação e orgulho que sempre me deram e fizeram sentir, desde que comecei o meu percurso académico, até à data de hoje.

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo projectar e construir uma antena que opere em onda curta, *HF*, e que explore a propagação na ionosfera por efeito *NVIS*, de modo a permitir o estabelecimento de comunicações de curta distância em situações táticas e de emergência. Este projecto pode ter bastante interesse para o Exército Português, em teatros de operações em que o terreno seja bastante acidentado, como por exemplo o Afeganistão ou o Kosovo. A antena projectada e construída é composta por dois dipolos cruzados, com uma tipologia em v invertido, por forma a ser efectuada uma ligação de curta distância, com ângulos de elevação que podem atingir cerca de 88° a 89° para distâncias da ordem da dezena de quilómetros. Foi efectuada o dimensionamento teórico, a simulação do diagrama de radiação e posteriormente procedeu-se à construção e ensaio da antena, com resultados bastante satisfatórios.

Palavras-chave: Propagação *NVIS*, onda curta, reflexão ionosférica, dipolo de meia onda.

Abstract

The objectives of this master thesis, are to design, simulate, built and test an antenna operating in the high frequency band, and to explore the propagation in ionosphere by *NV/S* effect, to establish short distance communications, in tactical and emergency situations. This project may be a valuable tool for the Portuguese Army, in theaters where the terrain is very rugged, such as Afghanistan or Kosovo. The designed antenna is composed by two crossed dipoles with an inverted v topology allowing short distance communications in the high frequency band, with emission angles from about 88° to 89° , for distances of the order of dozens of kilometers. The design was performed by doing the theoretical analysis and simulation of the antenna, which was then built and tested with satisfactory results.

Keywords: *NV/S* propagation, *HF* communication, ionospheric reflection, half wavelength dipole

Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	II
Abstract.....	III
Índice	IV
Índice de Figuras	VII
Índice de tabelas.....	IX
Lista de Abreviaturas	X
1. Introdução.....	1
1.1 Objectivos	1
1.2 Motivação	1
1.3 Estado da Arte	2
1.3.1 Comunicação NVIS.....	2
1.4 Estrutura da Tese	4
2. Estudo dos Efeitos de Propagação na Ionosfera	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Parâmetros fundamentais do plasma ionosférico	5
2.2.1 Densidade de electrões.....	5
2.2.2 Frequência de plasma.....	6
2.2.3 Frequência ciclotrónica	8
2.2.4 Frequência de colisões	9
2.2.5 Ciclo solar.....	9
2.3 Modelo de camadas da ionosfera	9
2.3.1 Camada D	10
2.3.2 Camada E.....	11
2.3.3 Camada E _s	11
2.3.4 Camada F ₁	12
2.3.5 Camada F ₂	12
2.4 Modelos teóricos da propagação no plasma ionosférico	12
2.4.1 Modelo de Chapman	14

2.4.2	Modelo Linear.....	16
2.4.3	Modelo Parabólico.....	16
2.4.4	Modelo Exponencial	17
2.5	Cálculo das frequências de plasma para as várias camadas	17
2.5.1	Cálculos das frequências	17
2.5.2	Ionosondas	20
2.5.3	Máxima Frequência Utilizável (MUF)	21
2.5.4	Altura virtual.....	22
2.6	Cálculo das distâncias de propagação, em relação ao ângulo e à camada	22
2.7	Cálculo das atenuações	26
2.7.1	Cálculo das atenuações considerando uma reflexão na camada F_1	27
2.7.2	Cálculo das atenuações considerando uma reflexão na camada F_2	28
3.	Estudo teórico e simulação da antena <i>NVIS</i>	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Dipolo de meia onda.....	33
3.2.1	Simulação do diagrama de radiação do dipolo de meia onda	36
3.3	Antena <i>NVIS</i> com uma única frequência de ressonância	37
3.3.1	Simulação do diagrama de radiação da antena <i>NVIS</i> com uma única frequência de ressonância	40
3.4	Antena <i>NVIS</i> projectada	41
3.4.1	Simulação do diagrama de radiação da antena <i>NVIS</i> projectada	44
4.	Construção da antena <i>NVIS MR13</i> e ensaios.....	49
4.1	Material utilizado.....	49
4.2	Construção da antena	50
4.2.1	Caracterização da antena	54
4.3	Ensaio.....	56
4.3.1	Perfis do terreno	56
4.3.2	Escolha do local de testes.....	60
4.3.3	Equipamento utilizado para os ensaios	60
4.3.4	Montagens dos ensaios	61
4.4	Resultados experimentais	63
5.	Conclusões e perspectivas futuras.....	69

Bibliografia	71
ANEXOS.....	73

Índice de Figuras

Figura 1.1 Sistema da antena de Marconi, localizada em Poldhu, na Inglaterra. Retirado de [2].....	2
Figura 2.1 Exemplo de densidades de electrões para as várias camadas da ionosfera.....	6
Figura 2.2: Processo que origina a frequência de plasma.....	6
Figura 2.3 Frequência de plasma relativamente à altitude, durante as várias horas do dia	7
Figura 2.4 Movimento de electrões e iões positivos na presença de um campo magnético B_0	8
Figura 2.5 Modelo de camadas da ionosfera	10
Figura 2.6 Reflexões do tipo M	11
Figura 2.7 Reflexões do tipo N.....	11
Figura 2.8 Ângulo X relativo à vertical da Terra	15
Figura 2.9 Modelo linear da densidade de electrões	16
Figura 2.10: Modelo parabólico da densidade de electrões	16
Figura 2.11 Variação da densidade electrónica com a altitude	17
Figura 2.12 Frequências de plasma para o mês de Março.....	19
Figura 2.13 Frequências de plasma para o mês de Junho.....	20
Figura 2.14 Ionograma em tempo real	20
Figura 2.15 Altura virtual	22
Figura 2.16 - Modelo da forma de propagação das ondas na ionosfera	23
Figura 2.17 - Relação entre o alcance e o ângulo de elevação, na camada F_1 , para as alturas de 200, 250 e 300 km	24
Figura 2.18: Relação entre o alcance e o ângulo de elevação, para a camada F_2 , de acordo com as várias alturas	25
Figura 2.19: Lei de Snell.....	26
Figura 3.1 Resolução das equações de <i>Maxwell</i>	31
Figura 3.2 Distribuição aproximada de corrente no dipolo de meia onda	34
Figura 3.3 Diagrama de radiação do dipolo de meia onda	35
Figura 3.4 Diagramas de radiação para o dipolo de meia onda a 10 metros do solo	36
Figura 3.5 Diagrama radiação em 3D do dipolo a 10 metros do solo.....	36
Figura 3.6 Representação dos campos dos dipolos cruzados	37
Figura 3.7 Coordenadas θ e ϕ	38
Figura 3.8 Diagramas horizontal e vertical para o dipolo ressonante a 4 MHz	40
Figura 3.9 Representação 3D do dipolo ressonante a 4 MHz	40
Figura 3.10 Representação da amplitude relativa do campo em função da frequência.....	43
Figura 3.11 Diagramas horizontal e vertical dos campos, para 4MHz, a 4 metros do solo.....	44
Figura 3.12 Diagrama para 4 MHz em 3D	44
Figura 3.13 Diagrama representando o SWR para a frequência ressonante quando $f = 4$ MHz	45
Figura 3.14 Diagramas horizontal e vertical dos campos, para 5 MHz, a 4 metros do solo.....	45
Figura 3.15 Diagrama para 5 MHz em 3D	46

Figura 3.16 Diagrama representando o SWR para a frequência ressonante quando $f = 5$ MHz	46
Figura 3.17 Diagramas horizontal e vertical dos campos, para 6 MHz, a 4 metros do solo	47
Figura 3.18 Diagrama para 6 MHz em 3D	47
Figura 3.19 Diagrama representando o SWR para a frequência ressonante quando $f = 6$ MHz	48
Figura 3.20 Diagramas de radiação para as frequências de 4 MHz, 5 MHz e 6 MHz	48
Figura 4.1 Antena NVIS MR13 espiada	50
Figura 4.2 Vistas superior (à esquerda) e inferior (à direita) da ligação entre os dipolos	51
Figura 4.3 Resultado final das ligações para a alimentação da antena	52
Figura 4.4 Base metálica da antena	52
Figura 4.5 Pormenor da união entre o fio de antena e o cordão, e mosquetão	53
Figura 4.6 Balun toroidal de 1:1	53
Figura 4.7 Pormenor da malha do cabo	54
Figura 4.8 Pormenor do isolante em teflon, do cabo	54
Figura 4.9 Leitura da frequência de ressonância para f_1 , medida no <i>Network Analyzer</i>	55
Figura 4.10 Leitura da frequência de ressonância para f_2 , medida no <i>Network Analyzer</i>	55
Figura 4.11 Perfil entre Amadora e Lazarim	57
Figura 4.12 Ligação Academia Militar – EID, obtida através do Google Maps	57
Figura 4.13 Perfil entre Amadora e Cabo da Roca	58
Figura 4.14 Ligação Academia Militar – Cabo da Roca, obtida através do Google Maps	58
Figura 4.15 Perfil entre Barcarena e Cheleiros	59
Figura 4.16 Ligação Barcarena – Cheleiros, obtida através do Google Maps	59
Figura 4.17 Pormenor da linha coaxial macho (à esquerda) e fêmea (à direita) dentro do mastro	61
Figura 4.18 Comutador coaxial de 4 entradas	61
Figura 4.19 Rádio E/R PRC 525, utilizado nos ensaios, localizado em Barcarena	62
Figura 4.20 Antena multifilar para E/R PRC 525, da EID	62
Figura 4.21 Perfil da ligação Barcarena - Cheleiros	63
Figura 4.22 Absorção ionosférica da camada D	63
Figura 4.23 Mapa ionosférico para a frequência crítica na camada F_2	64
Figura 4.24 Antena Harris RF 1936, localizada em Barcarena	65
Figura 4.25 Perfil da ligação Barcarena – Santa Cruz	66
Figura 4.26 Perfil da ligação Barcarena - Alpiarça	67
Figura 4.27 Antena filar construída pela EID para o PRC 525	68

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Alturas virtuais das camadas	23
Tabela 2.2 Tabela com os ângulos de elevação para a camada F_1	24
Tabela 2.3 Tabela com os ângulos de elevação para a uma reflexão na camada F_2	25
Tabela 3.1 Valores de amplitude dos dipolos em relação à frequência	42
Tabela 4.1 Valores da escala calibrados, do receptor ICOM.....	56
Tabela 4.2 Características da ligação Amadora (Academia Militar) - Lazarim	57
Tabela 4.3 Características da ligação Academia Militar (Amadora) – Cabo da Roca.....	58
Tabela 4.4 Característicasda ligação Barcarena - Cheleiros.....	59
Tabela 4.5 Potências do sinal em função da frequências para a ligação <i>NVIS</i> , Cheleiros-Barcarena	65
Tabela 4.6 Características da ligação Barcarena – Santa Cruz	66
Tabela 4.7 Características da ligação Barcarena - Alpiarça	67
Tabela 4.8 Potências do sinal em função da frequências para as ligações <i>NVIS</i> , Barcarena-Santa Cruz e Alpiarça	68

Lista de Abreviaturas

ATU - Automatic Tunning Unit, 53
EUFOR - European Rapid operational Force, 3
HF - High Frequency, 1
IFOR - Operation Joint Endeavour, 3
IRE - Instituto de Rádio Engenheiros, 5
IRI, International Reference Ionosphere, 9
ITU - International Telecommunications Union, 21
KFOR - Kosovo Force, 3
LOS - Line of Sight, 1
NATO - North Atlantic Treaty Organization, 3
NVIS - Near Vertical Incidence Skywave, 1
ONU - Organização das Nações Unidas, 3
PROE - Propagação e Radiação de Ondas Electromagnéticas, 69
ROE - Relação de Onda Estacionária, 54
RSSI - Received Signal Strength Indicator, 56
SFOR - Stabilization Force, 3
SWR - Standing Wave Ratio, 54
TO - Teatros de Operações, 1

1. Introdução

1.1 Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo principal o projecto de uma antena com polarização horizontal, estrategicamente dirigida para a exploração do conceito de *NVIS - Near Vertical Incidence Skywave*.

Os vários tipos de antenas usados actualmente pelas Forças Armadas, apresentam alguns problemas na comunicação em onda curta (High Frequency – HF), por reflexão na ionosfera (*NVIS*) para ângulos de fogo elevados, entre cerca de 60° a cerca de 89°. Pretende-se explorar esta forma de comunicação para comunicações tácticas e de emergência, a curta e média distância, imediatamente acima da linha de vista (*line of sight*).

Numa primeira fase, pretende-se efectuar o dimensionamento teórico de uma antena, que satisfaça os requisitos de largura de banda e ganho pretendidos, que são indicados mais à frente na dissertação. Seguidamente, utilizando modelos já existentes, simula-se o comportamento da antena com vista a obter os diagramas de radiação e os parâmetros de radiação usando o ambiente *MMANA-Gal basic* e o ambiente *Matlab*. Por último procede-se à construção e ensaio da antena, medindo as características de radiação: o campo radiado, a potência na recepção, o parâmetro S_{11} e largura de banda, entre outras características.

1.2 Motivação

Nos teatros de operações (TO), em que o terreno é montanhoso, há dificuldades em conseguir comunicar através da onda de solo. Para distâncias significativamente grandes, da ordem dos milhares de quilómetros, pode-se utilizar a onda curta, com ângulos de incidência máxima da ordem dos 30°, mas para distâncias da ordem das dezenas de quilómetros até uma ou duas centenas, é necessário possuir um ângulo de fogo mais elevado, entre cerca de 60° a cerca de 89°.

Do ponto de vista táctico, este conceito de radiocomunicações, permite a uma força táctica ser lançada num TO, e no imediato estabelecer e manter-se em comunicação através de um *relink* sem estar dependente de infra-estruturas existentes, tais como, retransmissores, ligações por satélites ou outros meios de transmissão.

Este conceito pode também ser aplicado em caso de catástrofe natural ou de um atentado terrorista, em que os sistemas de comunicações fiquem inoperantes, e em que haja necessidade de restabelecer as comunicações de curta e média distância, rapidamente e com os poucos meios disponíveis nessas situações.

Os motivos expostos, e a possibilidade de explorar o conceito de uma antena *NVIS* que possibilite a melhoria da capacidade de comunicação nas situações referidas despertaram o meu interesse como aluno da Academia Militar, no curso de Engenharia de Transmissões, pois permitem-

me dar uma contribuição para uma melhoria da capacidade operacional do ramo de Transmissões do Exército Português.

1.3 Estado da Arte

1.3.1 Comunicação NVIS

Carl F. Gauss foi a primeira pessoa a sugerir a existência da ionosfera, em 1839, afirmando que a variação diária do campo magnético da Terra, poderia ter origem nas correntes eléctricas da atmosfera. No ano de 1860 Lord Kevin referiu que poderia existir na atmosfera uma camada reflectora. Em 1899, Nikola Tesla estudou formas de efectuar comunicações a longa distância através da ionosfera [1], e no dia 12 de Dezembro de 1901, Marconi conseguiu pela primeira vez efectuar uma comunicação transatlântica através da ionosfera, enviando uma letra do código Morse, entre *Poldhu*, em Inglaterra e a estação de *Signal Hill*, em São João da Terra Nova, (*St John's, Newfoundland*) no Canadá [2].

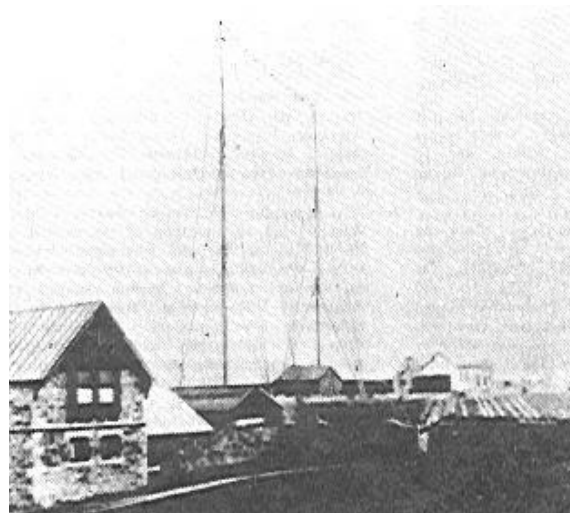


Figura 1.1 Sistema da antena de Marconi, localizada em Poldhu, na Inglaterra. Retirado de [2]

No ano de 1927, Sydney Chapman formulou a teoria para a formação da ionosfera. Em 1947 *Sir Edward Appleton* recebeu o Prémio Nobel por em 1927 ter provado e confirmado a existência da ionosfera. Em 1951 J. Whale começou a desenvolver o primeiro instrumento capaz de determinar a direcção e o ângulo de elevação das ondas de rádio [3]. Pensa-se que a primeira vez que foram feitas comunicações por NVIS por militares, tenha sido durante a Segunda Guerra Mundial, na batalha de Arnhem [4]. Em 1962, o Canadá, com o objectivo de estudar a ionosfera, enviou para o espaço o primeiro satélite, com o nome de *Alouette* [5].

As radiocomunicações por NVIS, em consequência dos conhecimentos adquiridos durante a Segunda Guerra Mundial, foram aplicadas pelas forças Americanas, nas Guerras da Coreia e do Vietname, e pelo Exército Português, na Guerra Colonial, em África, respectivamente.

Essa exploração, foi realizada durante a Guerra Colonial, por alguns especialistas de transmissões mais dedicados, mas nunca foi doutrina nas Forças Armadas Portuguesas este tipo de exploração radioelétrica. As comunicações através da ionosfera eram efectuadas em onda curta, onda longa ou onda média, até meados dos anos 70, tendo perdido relevância face ao aparecimento dos satélites.

No caso das missões de paz em que Portugal esteve envolvido, no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), *North Atlantic Treaty Organization (NATO)* e *European Rapid operational Force (EUFOR)*, designadamente nas missões da *Stabilization Force (SFOR)* e *Operation Joint Endeavour (JFOR)* na Bósnia-Herzegovina (1997), *EUFOR Congo* (2006) e *Kosovo Force (KFOR)* no Kosovo (2011), foram utilizadas comunicações por NVIS [6].

O interesse estratégico da onda curta, e em particular da propagação por NVIS, ressurgiu em virtude de se alcançarem padrões de autonomia das forças colocadas no terreno, para ligações a curta distância, com reflexão na ionosfera, explorando ângulos de radiação, bastante elevados.

As comunicações por efeito NVIS envolvem a aplicação de antenas com ângulos de radiação próximos da incidência perpendicular na ionosfera, entre cerca de 60° a cerca de 89° de elevação. As frequências utilizadas para efectuar NVIS, variam entre os períodos da noite e do dia, dependem da latitude e longitude do lugar, e também sofrem influência da actividade solar. A adequada selecção de uma frequência próxima da frequência crítica de reflexão ionosférica, terá de ser feita criteriosamente dependendo das condições de propagação.

De seguida, são referidas algumas vantagens da comunicação NVIS:

- A comunicação por NVIS não requer nenhuma infra-estrutura tal como repetidores e satélites.
- Duas estações que empreguem técnicas de NVIS podem estabelecer comunicações de confiança sem o apoio de nenhum outro sistema adicional.
- As antenas preparadas para as frequências de NVIS operam relativamente próximas do solo. Os dipolos simples são antenas eficazes. As antenas de NVIS podem ser facilmente erguidas, num pequeno espaço de tempo, por uma pequena equipa ou apenas por um operador.
- Os terrenos com profunda orografia, vales profundos e curtas distâncias, não são nenhum problema para a propagação por NVIS, devido ao seu ângulo de fogo elevado.
- O trajecto de ida e volta da ionosfera ao solo, dependendo do ângulo de fogo, é curto, de algumas centenas de quilómetros, por vezes sujeitos a outros factores, tais como perdas por inserção de camadas intermédias da ionosfera.
- As técnicas de NVIS podem permitir a redução drástica do ruído e interferências, resultando numa substancial melhoria da relação sinal/ruído.
- Beneficiando de uma melhoria substancial na relação sinal/ruído, e de perdas no trajecto inferiores, as comunicações por NVIS necessitam de uma potência de emissão relativamente baixa, da ordem de 20 W.

1.4 Estrutura da Tese

Considerando a interdisciplinaridade das matérias apresentadas neste trabalho, pretende-se que o seu enquadramento nesta dissertação, tenha a seguinte organização:

Capítulo 1, Introdução. São referidos os objectivos da dissertação, a motivação do autor, o estado da arte e a respectiva estrutura.

Capítulo 2, Estudo dos Efeitos de Propagação na Ionosfera. Neste capítulo é estudada a propagação e reflexão na ionosfera, bem como a constituição do plasma ionosférico, parâmetros característicos e os vários modelos das camadas ionosféricas. Calculam-se também as frequências de plasma das várias camadas utilizadas na comunicação, assim como as atenuações que as ondas sofrem pelo atravessamento nas diferentes camadas.

Capítulo 3, Estudo Teórico e Simulação da Antena NVIS. Neste capítulo é apresentado o dipolo de meia onda, os seus fundamentos teóricos, características, cálculo dos campos e representação dos diagramas de radiação. Apresenta-se também o estudo teórico da antena NVIS projectada, o cálculo dos campos radiados e os respectivos diagramas de radiação.

Capítulo 4, Construção da antena e ensaios experimentais. Explica-se como foi construída a antena, o material que foi utilizado e a caracterização desta. São estudados vários perfis, explicados os ensaios e apresentados os resultados obtidos.

Capítulo 5, Conclusões e perspectivas futuras. Neste capítulo final, são apresentadas as conclusões de todo o trabalho executado, e são apresentadas algumas sugestões relativas à melhoria da antena construída e perspectivas de trabalhos futuros.

2. Estudo dos Efeitos de Propagação na Ionosfera

2.1 Introdução

O nome ionosfera foi definido em 1950, pelo comité do Instituto de Rádio Engenheiros (IRE), como sendo a parte superior da atmosfera da Terra, onde estão presentes iões e electrões, em quantidades suficientes para afectar a propagação das ondas de rádio [7].

A ionosfera é composta por um plasma maioritariamente frio, ionizado principalmente pela radiação ultravioleta proveniente do sol, e abrange uma altitude que se inicia a cerca de 60 km da superfície da Terra e se estende até uma altura de cerca de 600 km [8]. Este plasma apresenta densidade electrónica variável, sendo possível aplicar um modelo estratificado com várias camadas. A densidade electrónica varia com a quantidade de energia electromagnética (radiação ultra-violeta) recebida do sol, portanto varia com a hora do dia, a estação do ano e os ciclos solares. Nas camadas mais baixas, a densidade de electrões é baixa, ao contrário da frequência de colisões que é elevada, e é onde se nota uma maior influência dessas colisões, nas perdas que a camada D origina [9].

2.2 Parâmetros fundamentais do plasma ionosférico

2.2.1 Densidade de electrões

A ionização dos átomos neutros existentes na ionosfera resulta da radiação cósmica e principalmente da radiação solar. Em períodos de elevada actividade solar, a luz ultravioleta e os raios-x têm elevada influência. Através de um modelo atmosférico, conhecendo o fluxo solar, a absorção e a eficiência de ionização dos vários constituintes, é possível calcular as densidades de iões e electrões na ionosfera [10]. A densidade de electrões varia com a hora do dia, com as estações do ano, com a distância à superfície terrestre, entre outros, como já referido anteriormente.

Na Figura 2.1¹, pode ver-se como variam os valores da densidade de electrões em função da altitude.

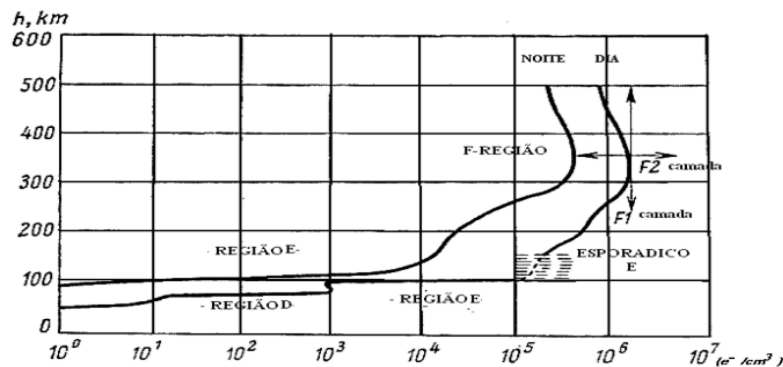


Figura 2.1 Exemplo de densidades de electrões para as várias camadas da ionosfera

De acordo com a Figura 2.1, é possível adoptar, para descrever a ionosfera, um modelo estratificado com várias camadas, com diferentes graus de ionização e diferentes características.

2.2.2 Frequência de plasma

A frequência de plasma, f_p , resulta de uma perturbação inicial, considerando que não existe campo magnético imposto, quando as partículas neutras do gás que constitui o plasma são separadas em termos de electrões e iões dando origem a duas camadas com espessura dx e com uma densidade de carga superficial $q \cdot N \cdot dx$ [11], como demonstrado na Figura 2.2².

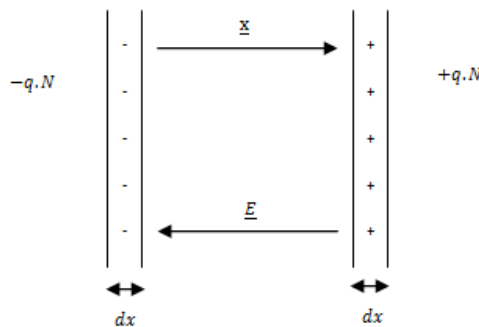


Figura 2.2: Processo que origina a frequência de plasma

¹ Fonte: Mateus, Alexandre C. - Soluções W.K.B. para o cálculo da intensidade de campo na baixa ionosfera

² Fonte: Adaptado de Figanier, J. - Aspectos de Propagação na Atmosfera

A partir da expressão $\nabla \cdot \underline{D} = \rho$, é criado um campo eléctrico dado por:

$$\epsilon_0 \cdot E = -q \cdot N \cdot x$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..1)

As partículas vão estar sujeitas a tais forças, dando origem a uma oscilação à volta da posição de repouso, tendo uma frequência característica, por definição, denominada de frequência de plasma dada por:

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q^2 N}{m_e \epsilon_0}}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..2)

Como esta expressão só depende de N, pois as restantes variáveis são conhecidas e constantes, pode-se utilizar a seguinte aproximação:

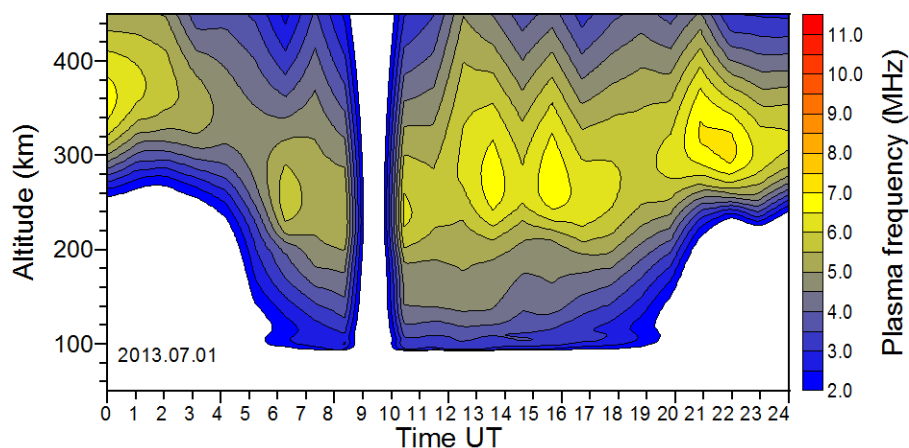
$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \sqrt{80.55N}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..3)

Em que N corresponde à densidade de electrões por m³.

A Figura 2.3³ ilustra a variação da frequência de plasma em função da altitude, para as várias horas do dia 1 de Julho de 2013, medida através de uma ionosonda pertencente ao observatório de Ebro, em Espanha.

Analisando os valores da ionosonda para este dia, é possível ver que, das 12h UT até cerca das 18h UT, a frequência de plasma oscila entre os 6 MHz e os 8 MHz, para uma altitude de cerca de 250 km. Entre as 21h UT e as 23h UT, para a mesma altitude a frequência de plasma situa-se entre os 4 MHz e os 5 MHz, aproximadamente. Para se conseguir ter uma reflexão na ionosfera, e a frequência de plasma variar entre os 6 e os 7 MHz aproximadamente, é necessário aumentar a altitude, a partir de 300 km.



³ [http](#) Figura 2.3 Frequência de plasma relativamente à altitude, durante as várias horas do dia

2.2.3 Frequência ciclotrónica

Dada uma partícula de carga q , com uma velocidade v , esta sofre por acção de um campo magnético de indução B , uma força (denominada de força de *Lorentz*) dada por

$$F = q.v \times B$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..4)

Num campo magnético uniforme, a componente da velocidade da partícula segundo o campo não é afectada, mas a partícula fica sujeita a uma força transversal constante pelo que descreve uma trajectória helicoidal, em torno das linhas de força do campo e cuja projecção transversal é uma circunferência, como é mostrado na Figura 2.4 ⁴.

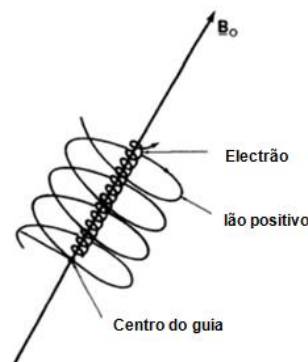


Figura 2.4 Movimento de electrões e iões positivos na presença de um campo magnético B_0

Depois de vários cálculos resulta a expressão da giro-frequência dada por

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \frac{|q|B}{m}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..5)

Esta frequência é independente do raio da órbita e da velocidade da partícula, e só depende do valor da indução magnética, B , e da natureza da partícula. As giro-frequências para as várias espécies presentes são frequências características de um plasma contido num campo magnético uniforme. [11] Tem-se um valor estimado para a giro-frequência de $f_B = 1.4 \times 10^6$, considerando a indução do campo magnético da Terra de $B_0 = 0.5$ [Gauss] = 0.5×10^{-4} [Tesla].

⁴ Fonte: Adaptado de Davies, Kenneth - Ionospheric Radio, 1990

2.2.4 Frequência de colisões

A frequência de colisões, ν é dada pelo número de colisões por segundo, entre os electrões e as várias partículas dos diferentes gases constituintes da ionosfera. Esta varia de acordo com a altitude das camadas.

A densidade de gases na atmosfera diminui com a altitude. Assim com a diminuição da altitude, aumenta a densidade do plasma ionosférico e diminui a sua ionização, visto que estas camadas estão mais longe da principal fonte de ionização, a radiação ultravioleta, proveniente do sol. Sendo assim, os electrões livres, têm maior probabilidade de chocar com as partículas neutras, resultando num número de colisões elevado que se traduz numa atenuação do sinal electromagnético que atravessa essas camadas. Nas camadas a maior altitude há um maior grau de ionização e uma densidade mais baixa, pelo que o número de colisões diminui, o que se traduz em fracas perdas por atravessamento das camadas superiores [12].

2.2.5 Ciclo solar

O ciclo solar foi descoberto em 1843 por Samuel Schwabe, e designa a alteração periódica na actividade solar. O ciclo solar pode ser caracterizado pelas manchas solares (*sunspots*), tem a duração de cerca de 11 anos e pode provocar alterações no clima e nas transmissões via ionosfera [13].

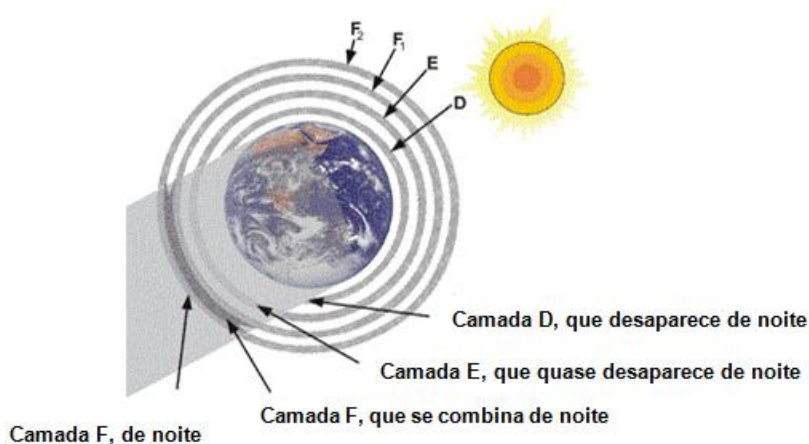
2.3 Modelo de camadas da ionosfera

O *International Reference Ionosphere (IRI)*, definiu um modelo empírico utilizado pela comunidade internacional, utilizado como modelo de referência que descreve o comportamento médio do plasma ionosférico. Estas camadas são individualizadas pela densidade electrónica, portanto pela frequência de plasma, assim como a frequência de colisões. Estas características são medidas por ionosondas, que são abordadas num ponto de um subcapítulo mais a frente [14].

Este modelo divide a ionosfera em 4 regiões diferentes (ou em 5 se se considerar a camada esporádica E) e permite saber a densidade electrónica, a densidade de um pico específico de uma camada, a temperatura da atmosfera neutra, a temperatura e concentração ao nível dos iões, entre outros [15].

- Camada D – Inicia-se a uma altitude de cerca de 50 km e é a que está mais próxima da Terra;
- Camada E – Situada a cerca de 100 km;
- Camada F – Da qual fazem parte, a F_1 e a F_2 , a partir de cerca de 140 km e 200 km de altitude, respectivamente.

A Figura 2.5 **Error! Reference source not found.** ⁵, ilustra o modelo de camadas



ionosféricas:

2.3.1 Camada D

A camada D é a primeira camada da ionosfera, abrange altitudes desde os 50 km até cerca de 90km. Actua como atenuador para a onda curta (HF), e é uma camada muito mais densa que as camadas situadas acima desta. A densidade das moléculas de ar, permite que os iões se recombinem formando átomos electricamente neutros, rapidamente. A camada D existe preferencialmente em meses quentes do ano, devido à grande altitude a que o sol se encontra relativamente à Terra, e ao tempo de luz solar, que é superior nesses meses. Esta camada tende a

desaparecer depois do sol se pôr [16]. Nas comunicações por onda longa, actua como uma camada reflectora.

⁵ Fonte: Adaptado de http://lunaticoutpost.com/usersmiles/graphic/images/2011/January/24/7576_4D3E2EEF.gif, acedido em 12 de Agosto de 2013

2.3.2 Camada E

Esta camada inicia-se a cerca de 90 km e estende-se até aos 140 km, aproximadamente. Assim como a camada D, esta camada é ionizada durante o dia, nas horas de luz solar, atingindo o seu máximo por volta do meio-dia. Por norma, durante a maioria do ano é uma camada absorvente, contudo, durante os meses mais quentes poderá servir como reflectora [16].

2.3.3 Camada E_s

Esta camada denomina-se por E esporádica (E_s), aparece em alturas em que a actividade solar se encontra mais activa e é uma camada relativamente fina. Em termos de permanência, tanto pode durar alguns minutos, como prolongar-se durante algumas horas. Devido à sua breve existência, por vezes, podem dar-se determinados percursos de propagação que sem esta não seriam possíveis, originando uma reflexão parcial, reflexão essa que pode gerar algumas dúvidas em termos de percursos de propagação [16]. Estes percursos podem ser do tipo M, representados na Figura 2.6, ou do tipo N presentes na Figura 2.7 ⁶.

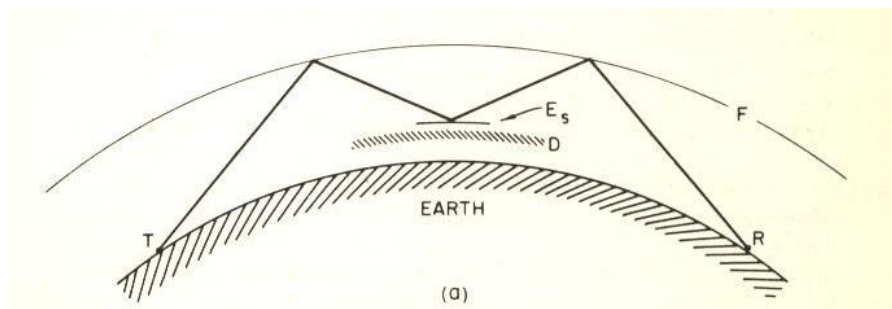


Figura 2.6 Reflexões do tipo M

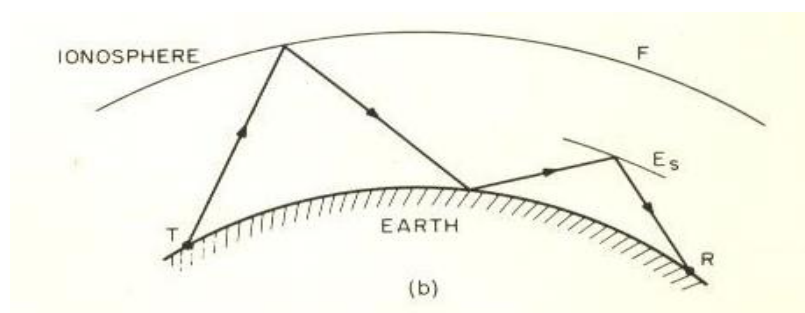


Figura 2.7 Reflexões do tipo N

⁶ Fonte: Davies, Keneth - Ionospheric Radio Propagation, 1965

2.3.4 Camada F₁

Esta camada faz parte da camada F, camada essa, que tem um nível de ionização superior às camadas D e E. A camada F₁ começa aproximadamente nos 140 km e atinge cerca de 300 km. Durante o dia, possui grande concentração de electrões livres, e durante a noite essa densidade vai decrescendo gradualmente [16]. Esta camada é mais pronunciada durante o Verão, e durante as tempestades ionosféricas.

2.3.5 Camada F₂

A camada F₂, situa-se entre cerca de 300 km e estende-se para cima dos 500 km. Acima de cerca de 500 km de altitude para a onda curta (HF), não é relevante, pois a essa altitude os valores da densidade electrónica são muito baixos, sendo o seu pico de ionização a partir de cerca dos 300 km.

É a camada de reflexão ionosférica mais importante em comunicações de onda curta (HF). A sua altitude varia com a hora do dia e a parte mais ionizada situa-se a cerca de 400 km de altitude, e tal como outras, por volta do meio-dia atinge níveis de ionização máximos.

Assim que o sol se põe, a camada anterior (F₁), funde-se com esta, e reduz-se para cerca de 300 km de altitude. A altitude e o decréscimo da ionização, variam ao longo do dia, com a estação do ano e dependem também do ciclo solar.

2.4 Modelos teóricos da propagação no plasma ionosférico

A existência de electrões livres na ionosfera vai afectar a propagação das ondas electromagnéticas.

Considerar-se-á inicialmente um modelo muito simples, em que se despreza a acção do campo magnético e as perdas por colisão. Neste pressuposto a única força actuante sobre os electrões é devida ao campo eléctrico.

A equação da conservação do momento linear (equação fundamental da dinâmica dos electrões) será dada por:

$$m_e \frac{dv_e}{dt} = qE$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..6)

Em que q representa a carga do electrão ($q=-1,6 \times 10^{-19}$ [C]), m_e é a massa do electrão ($m_e=9,1 \times 10^{-31}$ [kg]), E é o campo actuante e v_e a velocidade do electrão.

A densidade de corrente de convecção criada é dada por:

$$J = Nqv_e [Am^{-2}]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..7)

Em que N (dada em electrões/ m^3) representa a densidade electrónica do plasma.

Admitindo que o campo actuante é alternado sinusoidal, e considerando apenas o regime forçado, a equação (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..1, escreve-se:

$$j\omega m_e v_e = qE$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..8)

Retirando a velocidade desta equação e substituindo na equação (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..2, resulta:

$$J = -jE \frac{Nq^2}{\omega m_e}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..9)

Substituindo esta densidade de corrente na equação de Maxwell

$$\nabla \times H = J + j\omega \epsilon_0 E$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..10)

Obtém-se:

$$\nabla \times H = j\omega \epsilon_0 E \left(1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m_e \epsilon_0} \right)$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..11)

O que permite definir uma permitividade dieléctrica equivalente:

$$\epsilon_{eq} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..12)

Em que ω_p designa a frequência de plasma

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..13)

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{\epsilon_0 m_e}} \left[\text{rads}^{-1} \right]$$

Inserindo o ϵ_{eq} na equação de dispersão, obtém-se:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2} \left[\text{radm}^{-1} \right]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..14)

Esta expressão é análoga à que se obtém num guia metálico oco para os modos TE e TM, em que a frequência de corte do guia, é aqui representada pela frequência de plasma.

Há portanto que distinguir 3 casos:

- 1) Se $f > f_p$, o radicando é positivo, k é real, o que significa que há propagação sem atenuação, e portanto a onda pode penetrar na camada e propagar-se através dela.
- 2) Se $f = f_p$, o radicando é nulo, portanto $k=0$ e não há propagação dentro da camada, a onda é rejeitada pela camada e é absorvida.
- 3) Se $f < f_p$, o radicando é negativo, e portanto k torna-se imaginário, ou seja, há uma atenuação da onda que não se pode propagar dentro da camada e portanto volta para a Terra.

Este modelo simplificado permite explicar a relação entre os vários mecanismos de propagação e a sua relação com a frequência de plasma e a frequência da onda emitida.

Como os ângulos de reflexão são elevados, próximos da incidência normal o modelo não está longe da realidade. Um modelo mais refinado, aplicado à propagação via ionosfera em onda curta é dado em [17] e [11].

Se o plasma tiver perdas, representadas por uma frequência de colisões ϑ entre os electrões e as partículas neutras existentes no plasma frio, e continuando a ignorar a influência do campo magnético, a equação da dinâmica do electrão vem modificada para:

$$j\omega m_e v_e + \vartheta m_e v_e = qE$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..15)

O que introduzido nas equações de maxwell dá uma permitividade dieléctrica equivalente para o plasma frio com colisões, dada por:

$$\epsilon_{eq} = \epsilon_0 \left(1 - j \frac{\omega_p^2}{\omega(j\omega + \vartheta)} \right)$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..16)

A que corresponde uma constante de atenuação dada por:

$$\alpha = \frac{\omega_p^2 g}{2c(\omega^2 + g^2)} \left[\text{Neper m}^{-1} \right]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..17)

2.4.1 Modelo de Chapman

Chapman foi o primeiro físico a estabelecer um modelo teórico para a distribuição da densidade de partículas de uma camada ionosférica. Este modelo é o modelo teórico da ionosfera que nos dá a variação da densidade de electrões com a altura. Admite-se que existe apenas um tipo de gás, a estratificação é considerada planar, e diz-se que existe um feixe paralelo de radiação ionizada, monocromático que provém do sol, assim como se considera a atmosfera isotérmica [8].

A densidade de electrões N , é dada pela seguinte expressão:

$$N = N_m * e^{\frac{1}{2}(1 - \xi - \sec(X))e^{-\xi}}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..18)

Sendo N_m a densidade electrónica máxima (em electrões/m³) e X o ângulo que o sol faz com a vertical da Terra ⁷, h diz respeito à altura; h_m corresponde à altura onde N_m é máxima, e H é a altura de escala, tudo isto medido em km.

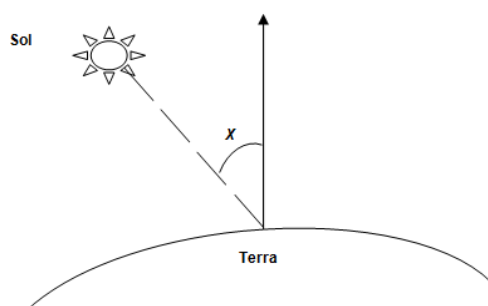


Figura 2.8 Ângulo X relativo à vertical da Terra

⁷ Fonte: Adaptado de Mateus, Alexandre C. - Soluções W.K.B. para o cálculo da intensidade de campo na baixa ionosfera

$$\xi = \frac{h - h_m}{H}$$

$$H = \frac{RT}{Mg}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..19)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..20)

Onde R é a constante universal dos gases; $T(h)$ função da temperatura com a altura em $^{\circ}\text{K}$; M corresponde à massa de um quilograma- mol e g é a aceleração gravítica

Surgiram vários modelos mais simples por forma a conseguir obter-se equações diferenciais conhecidas. De seguida são apresentados alguns desses modelos.

2.4.2 Modelo Linear

Neste modelo, decompõe-se a ionosfera em camadas sucessivas simples, em que a densidade de electrões N , aumenta linearmente com a altura h , de um ponto a h_0 acima do solo, e a é o declive de altura constante de N , dado por:

$$N - N_0 = a(h - h_0)$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..21)

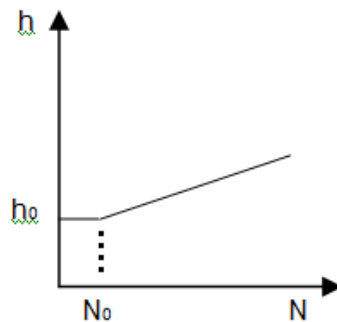


Figura 2.9 Modelo linear da densidade de electrões

2.4.3 Modelo Parabólico

No modelo parabólico, quando X e ξ são muito pequenos, a expressão da densidade de electrões toma a forma representada na (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..), onde se traduz a equação da parábola, em que a distância da base ao nível de densidade máxima é $y_m = 2H$.

$$N = N_0 * e^{\frac{1}{2}(\frac{1}{\xi^2})} = N_0 * \left\{ 1 - \left(\frac{h - h_0}{2H} \right)^2 \right\}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..22)

Na Figura 2.10⁸ é representado o modelo parabólico da densidade de electrões.

⁸ Fonte: Adaptado de Faro, Manuel A. - Introdução ao Estudo das Ondas Electromagnéticas, 1961-62

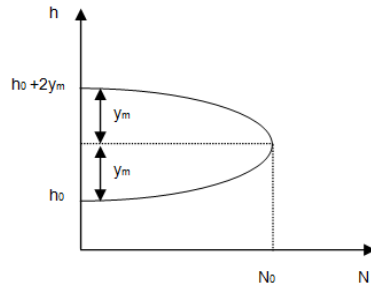


Figura 2.10: Modelo parabólico da densidade de electrões

2.4.4 Modelo Exponencial

O modelo exponencial está representado na equação **Error! Reference source not found.**, em que h_r é um nível de referência onde $N = N_r$, e em que o sinal (+) é a base da ionosfera e o sinal (-) representa o topo desta.

$$N = N_r * e^{\pm \frac{(h-h_r)}{2H}}$$

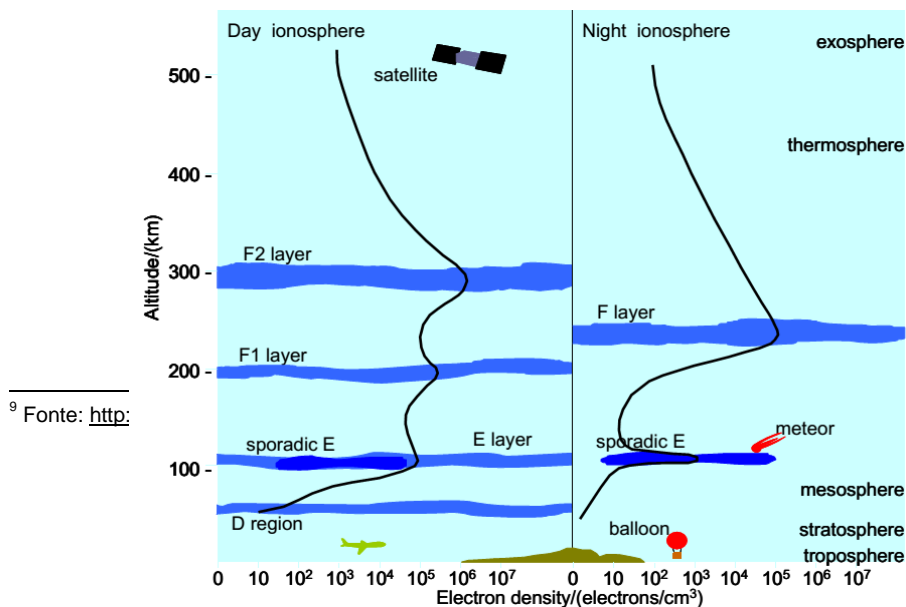
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..23)

2.5 Cálculo das frequências de plasma para as várias camadas

Neste subcapítulo vão-se calcular as frequências de plasma para as várias camadas, tendo como base a Figura 2.11 ⁹, que ilustra as altitudes consideradas para o período de dia e para o período de noite, que definirá quais as camadas onde vai haver penetração e quais as camadas onde se dará reflexão.

2.5.1 Cálculos das frequências

Nas condições em que a frequência de trabalho (f) é superior à frequência de plasma (f_p),



existe penetração na camada, e como tal, não existe reflexão. Quando a frequência de trabalho é inferior à frequência de plasma, existe reflexão, como já foi explicado anteriormente. Vai-se trabalhar com duas frequências principais, f_1 que corresponde a 4 MHz e f_2 que corresponde a 6 MHz.

2.5.1.1 No período de dia

- Camada D

Para uma altitude de cerca de 80 km, densidade $N = 10^9$ (electrões/m³), tem-se $f_p = 2.84 * 10^5$ Hz. Para qual que seja a frequência de trabalho, dentro da banda utilizada, vai existir sempre penetração na camada D, pois $f_p = 2.84 * 10^5 < f_1, f_2$.

- Camada E

Considerando uma altitude de cerca de 100 km e $N = 10^{10}$ (electrões/m³), tem-se $f_p = 8.97 * 10^5$ Hz. Como f é superior a qualquer frequência da gama de frequências de trabalho, ($f_p =$

Figura 2.11 Variação da densidade electrónica com a altitude
 $8.97 * 10^5 < f_1, f_2$) obtém-se penetração na camada E.

- Camada F₁

Para uma altitude de cerca de 200 km, tem-se um valor de $N = 10^{11}$ (electrões/m³), resulta numa frequência de plasma de $f_p = 2.84 * 10^6$ Hz. Nesta camada, continua a existir penetração na ionosfera. ($f_p = 2.84 * 10^6 < f_1, f_2$)

- Camada F₂

Considerando a camada F₂, situada a cerca de 300 km, com uma densidade de $N = 10^{12}$ (electrões/m³), e $f_p = 8.97 * 10^6$, para qualquer que seja a frequência de trabalho, (dentro da gama com que vamos trabalhar, 4 a 6 MHz) a frequência de plasma, será sempre superior $f_p = 8.97 * 10^6 > f_1, f_2$, portanto existe reflexão na camada F₂.

2.5.1.2 No período de noite

Considerando na mesma a Figura 2.11, mas desta vez analisando a parte da noite, e verificando, como já foi referido anteriormente, que a camada D desaparece, e as camadas F₁ e F₂, se unem numa só.

- Camada E

Para uma altitude de cerca de 100 km, e densidade de $N = 10^9$ (electrões/m³), resulta numa frequência de plasma de $f_p = 2.84 * 10^5$ Hz. Como $f_p = 2.84 * 10^5 < f_1, f_2$ vai existir sempre penetração na camada E.

- Camada F

Considerando que a camada F se encontra a uma altitude de cerca de 250 km, tem-se $N = 10^{11}$ (electrões/m³), obtendo assim uma frequência de plasma de $f_p = 2.84 * 10^6$ Hz. Nesta camada, continua-se a ter penetração na ionosfera. ($f_p = 2.84 * 10^6 < f_1, f_2$), pode-se concluir que é necessário efectuar a comunicação a uma maior altitude, de forma a que a densidade de electrões seja maior, originando uma frequência de plasma superior à frequência de trabalho, para que a onda se reflecta na ionosfera.

Algumas conclusões

De dia, as camadas D e E originam perdas, contudo é possível comunicar através de uma reflexão na camada F₂, a cerca de uma altitude de 300 km.

Durante a noite, as camadas D e E tendem a desaparecer, diminuindo assim as perdas, a uma altitude um pouco superior àquela que a onda se reflectia durante o dia, como tal, é necessário um valor superior de densidade de electrões (N), para que a frequência de plasma seja também superior à frequência de trabalho, e exista reflexão.

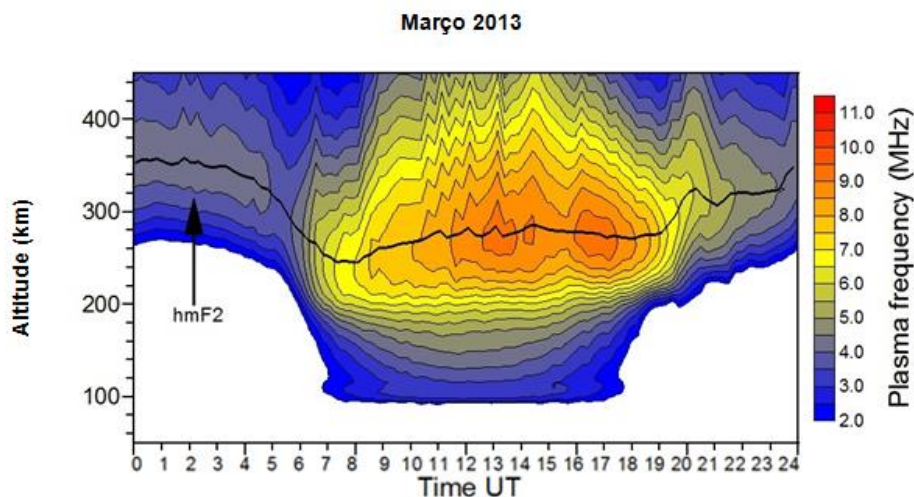


Figura 2.12 Frequências de plasma para o mês de Março

Através da Figura 2.12 e da Figura 2.13 ¹⁰, comparam-se as frequências de plasma, de acordo com a altitude, para a camada F₂, num período de Inverno (mês de Março) e num período de Verão (mês de Junho). É notável que no Inverno, só existe comunicação NVIS entre as 8h e as 18h sensivelmente. Nas outras horas do dia, as frequências de plasma são muito baixas.

¹⁰ Fonte: l'Ebre, Observatori de l'Ebre, 2012

De Verão, consegue-se efectuar comunicação *NVIS* praticamente durante todas as horas do dia, sendo estas com maior intensidade e maior facilidade de propagação entre as 8h e as 22h.

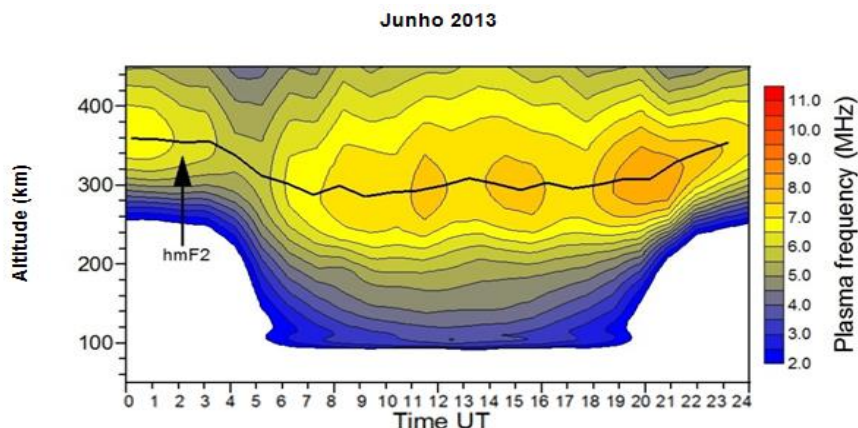


Figura 2.13 Frequências de plasma para o mês de Junho

2.5.2 Ionosondas

As ionosondas medem a frequência crítica (f_c), à qual a onda com incidência normal é reflectida. Através de um emissor que emite uma portadora, com um ângulo de incidência vertical, varrendo uma gama de frequências de 1 MHz até 20 MHz [17]. O sinal emitido é recebido num receptor junto ao emissor e calculado o tempo de ida e volta. É desta forma que se consegue caracterizar a ionosfera nas diferentes camadas [18].

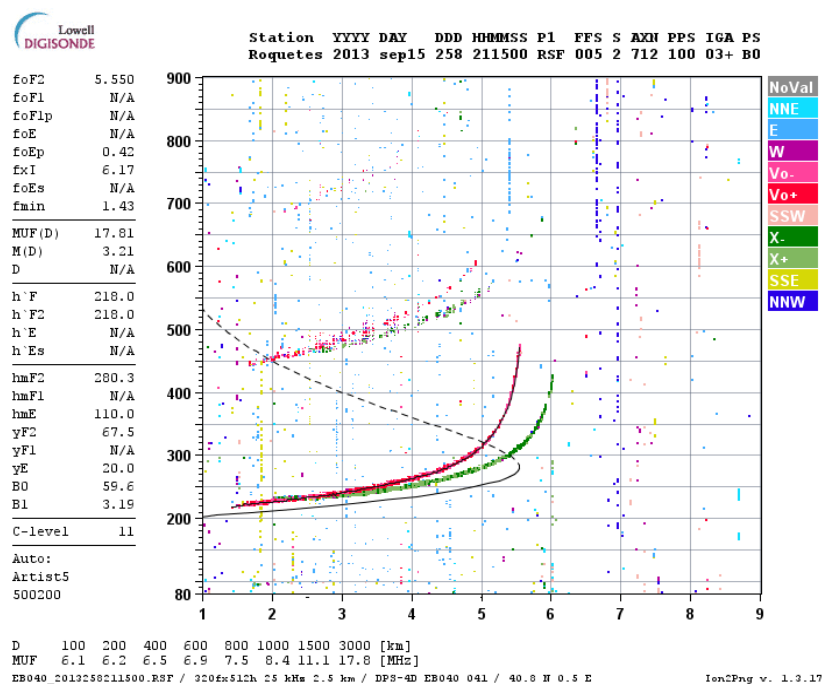


Figura 2.14 Ionograma em tempo real

A frequência de plasma é a frequência mais elevada, das frequências críticas a que existe reflexão. Os dados resultantes das ionosondas, depois de tratados em programas específicos, podem ser representados através de ionogramas, onde está presente a altura virtual em função da frequência de plasma, tal como se mostra na Figura 2.14 ¹¹.

2.5.3 Máxima Frequência Utilizável (MUF)

O *International Telecommunications Union (ITU)* criou a *recommendation ITU-R P.373-7* [19] que define o significado de MUF, conhecida internacionalmente por *Maximum Usable Frequency (MUF)*:

- 1) operational MUF, is the highest frequency that would permit acceptable performance of a radio circuit by signal propagation via the ionosphere between given terminals at a given time under specified working conditions(...)
- 2) basic MUF is the highest frequency by which a radiowave can propagate between given terminals, on a specified occasion, by ionospheric refraction alone(...)

A frequência de plasma máxima, determina quais as ondas emitidas com incidência vertical que perfuram uma certa camada, e quais as que são reflectidas. Esta frequência de plasma máxima, é designada por frequência crítica, f_c ou f_o , o seu valor máximo é o referido à F_2 .

Numa comunicação em onda curta, o ângulo entre o raio desta, e a vertical ao solo, é denominado por ângulo incidente, θ . Quando numa ligação com um dado ângulo incidente, maior que zero, a onda é reflectida e volta para a Terra, tem-se uma frequência máxima, superior à frequência crítica e denominada por *MUF* [20] [12].

A MUF pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$MUF = \frac{f_c}{\cos \theta}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..24)

¹¹ Fonte: Retirado de <http://www.obsebre.es/php/ionosfera/tempsreal.php>, acedido em 15 de Setembro de 2013

2.5.4 Altura virtual

As ondas de rádio são refractadas na ionosfera, e acima de uma certa frequência, designada por frequência crítica, são refractadas de tal forma que conseguem regressar à Terra. Um observador na Terra pode facilmente assumir que a onda é reflectida, a uma dada altura, apesar de na realidade a onda ser refractada a uma altitude menor que essa. O ponto onde parece existir a reflexão da onda, chama-se altura virtual e esta representado na Figura 2.15 ¹² [16].

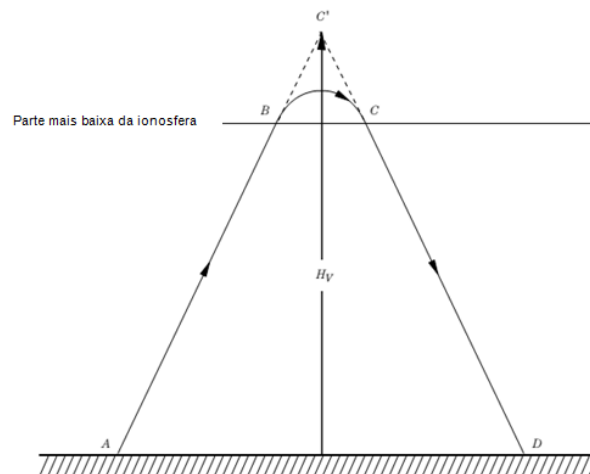


Figura 2.15 Altura virtual

2.6 Cálculo das distâncias de propagação, em relação ao ângulo e à camada

Neste subcapítulo, vão-se calcular os alcances que se consegue atingir, de acordo com o ângulo de incidência e a camada em que é feita a reflexão. Através do programa *Matlab*, foram feitos cálculos que relacionam a distância a que é feita a comunicação, o ângulo de fogo da antena, e a altura virtual das camadas F_1 e F_2 , representados pelas Figura 2.17 e Figura 2.18.

¹² Fonte: Adaptado de Carr, Joseph J., *Practical Antenna Handbook*, Fourth Edition, McGraw-Hill

A seguinte figura ilustra a reflexão nas camadas de acordo com a altura virtual.

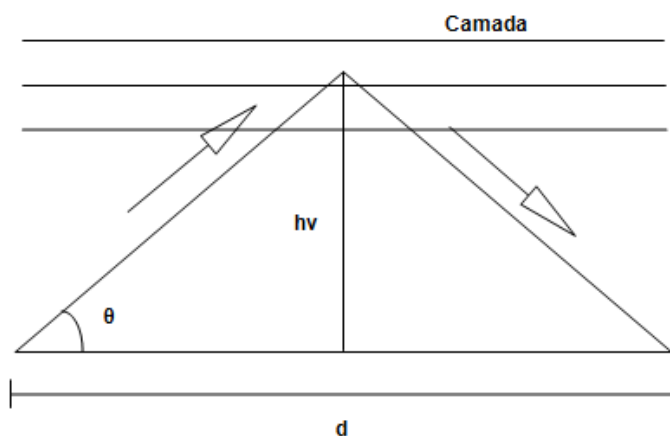


Figura 2.16 - Modelo da forma de propagação das ondas na ionosfera

Estes cálculos consistem em determinar o cateto adjacente, através do ângulo de fogo da antena e do cateto oposto, que é dado pela altura a que é feita a reflexão na camada da ionosfera, e depois, sabendo esse cateto adjacente, sabe-se o alcance máximo da comunicação, ou seja, o ponto onde esta vai ser recebida de volta, pela antena de recepção. Os cálculos vão ser feitos tendo em conta a terra plana, a figura seguinte mostra a forma como é considerada a propagação. Os valores da altura virtual utilizados e descritos na seguinte tabela 2.1, foram retirados de [11].

Tabela 2.1 Alturas virtuais das camadas

Camada	h_v (km)
F_1	200/300
F_2	200/400

Para simplificar os cálculos, dentro da gama das alturas dadas pela tabela anterior consideram-se três alturas virtuais sendo elas, 200, 250 e 300 km. Portanto a reflexão na camada F_1 dar-se-á entre os 200 e os 300 km. Vai-se considerar como distâncias mínima e máxima, de 20 km e 120 km.

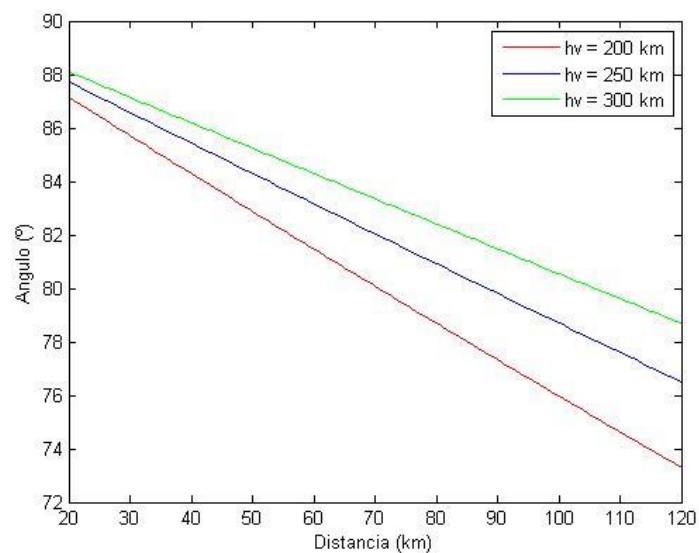


Figura 2.17 - Relação entre o alcance e o ângulo de elevação, na camada F_1 , para as alturas de 200, 250 e 300 km

A seguinte tabela contém os ângulos de elevação para as várias alturas e alcances:

Tabela 2.2 Tabela com os ângulos de elevação para a camada F_1

Altura virtual (km)	Alcance (km)	Ângulo de elevação
200	20	87°
200	120	73°
250	20	88°
250	120	77°
300	20	88°
300	120	78°

No caso da camada F_2 , consideram-se cinco alturas virtuais, 200, 250, 300, 350 e 400 km. O alcance pretendido mantém-se entre os 20 e os 120 km.

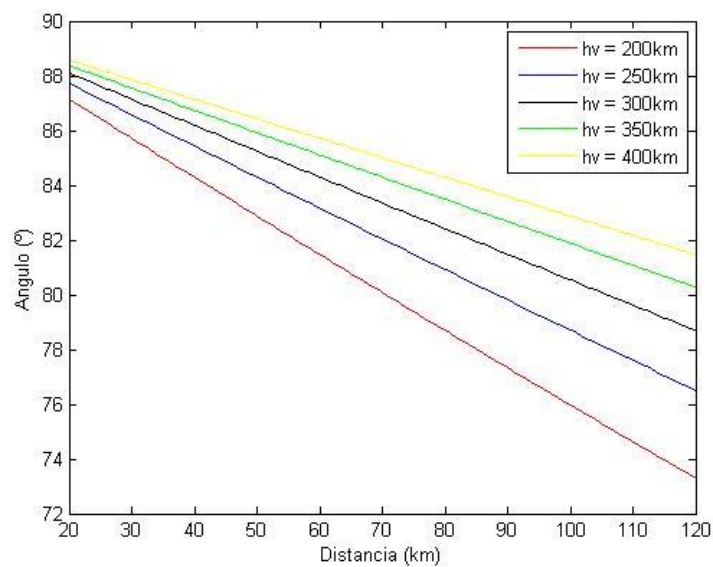


Figura 2.18: Relação entre o alcance e o ângulo de elevação, para a camada F_2 , de acordo com as várias alturas

A tabela seguinte dá os valores dos ângulos entre a altura da reflexão e a distância pretendido da comunicação:

Tabela 2.3 Tabela com os ângulos de elevação para a uma reflexão na camada F_2

Altura virtual (km)	Alcance (km)	Ângulo de elevação
200	20	87°
200	120	73°
250	20	88°
250	120	77°
300	20	88°
300	120	78°
350	20	88°
350	120	80°
400	20	89°
400	120	81°

2.7 Cálculo das atenuações

A propagação de ondas na ionosfera em onda curta (HF), faz-se geralmente entre os 3 MHz e os 30 MHz. Vai-se considerar o campo magnético ausente e que a estratificação das camadas da ionosfera é plana.

No caso da propagação por efeito *NVIS* estudada, pretende-se atingir distâncias curtas com ângulos de fogo elevados, razão pela qual o ângulo φ_0 (complementar do ângulo de fogo θ) é muito pequeno, cerca de 3° a 8° , o que resultará numa propagação na ionosfera quase vertical.

O índice de refração diminui com a altura, e para ângulos com a vertical muito pequenos, ou seja, para ângulos de fogo elevados, as perdas na trajectória são relativamente pequenas e para ângulos próximos de 90° , estas perdas podem ser desprezadas. A Lei de *Snell*, como está referido abaixo na equação (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..25), dá o desvio angular sofrido pela onda quando esta passa de uma camada da ionosfera para outra. Através desta lei, calcula-se o ângulo de incidência, por forma a poder determinar-se a distância que o raio reflectido percorre, para posteriormente se calcular a atenuação do percurso, nas diversas camadas da ionosfera.

No modo ordinário o índice de refração da camada é dado pela equação Error! Reference source not found.

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_0 \sin \varphi_0$$

$$n^2 = 1 - \left(\frac{fp}{f} \right)^2$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..25)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..26)

A Figura 2.19¹³ demonstra a lei de *Snell*:

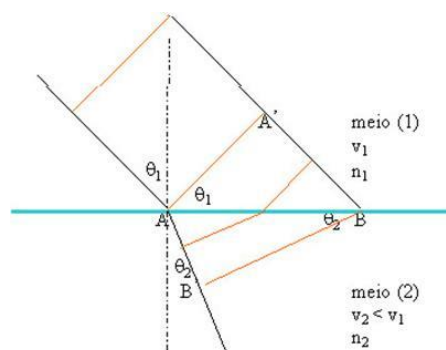


Figura 2.19: Lei de Snell

¹³ Fonte: Retirado de <http://www.iped.com.br/sie/uploads/9614.jpg>, acedido em 21 de Agosto de 2013

A Figura 2.19, demonstra o desvio que uma onda sofre, quando passa entre meios, com índices de refração diferentes.

2.7.1 Cálculo das atenuações considerando uma reflexão na camada F₁

No presente subcapítulo vão-se calcular as perdas por atravessamento das camadas D e E. Considera-se que as camadas são simétricas, como tal o ângulo de entrada do raio nesta, é o mesmo que o ângulo de saída. Considera-se que a reflexão se dá na camada F₁ a uma altura virtual de 250 km e que se pretende atingir um alcance de 20 km na comunicação. Para frequência de 4 MHz, considerando que a reflexão se dá na camada F₁ a uma altura virtual de 250 km e que se pretende atingir um alcance de 20 km na comunicação.

Cálculo da atenuação para a camada D:

Os valores da densidade de electrões (N), e da densidade de colisões ($N\vartheta$), (em que ϑ é o número médio de colisões por segundo), que se vão utilizar para os cálculos das atenuações das várias camadas, foram retirados do *Manual de Aspectos de Propagação na Atmosfera* do Prof. J. Figanier [11] e do livro de *Introdução ao Estudo das Ondas Electromagnéticas* do Eng.º M. J. Faro [17].

Tomando a espessura da camada D, como cerca de 40km.

$$At_D = e^{-2\alpha_D d}$$

$$\alpha_D = \frac{q^2 N \vartheta}{2c \epsilon_0 m \omega^2} = \frac{\omega_p^2 \vartheta}{2c(\omega^2 + g^2)}$$

$$\sin(87.95^\circ) = \frac{h\nu}{d}$$

$$N = 10^{10} \quad n_1 = 0.975, \quad \varphi_1 = 2.05^\circ, \quad \vartheta = 10^6$$

$$d = 40.026 \text{ km}, \quad \alpha_D = 8,4185 \times 10^{-5} \text{ [neper/m]}$$

$$At_D = e^{-6.74} = 0,001184 \text{ [neper]}$$

$$At_D = -29,27 \text{ dB}$$

Como $d = 40.024 \text{ km}$, é muito próximo da altura da camada, e o ângulo é pequeno (complementar a θ), de 2.05° apenas, pode-se concluir que a altura da camada considerada, não tem influência na distância percorrida pelo raio, isto é, a distância percorrida pelo raio, é aproximadamente igual à distância que o raio faz, medida com as alturas das camadas.

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..27)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..28)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..29)

Cálculo da atenuação para a camada E:

Considera-se uma espessura de camada de cerca de 50km.

$$At_E = e^{-2\alpha_E d}$$

$$\alpha_E = \frac{q^2 N \vartheta}{2c\epsilon_0 m \omega^2} = \frac{\omega_p^2 \vartheta}{2c(\omega^2 + \vartheta^2)}$$

$$\sin(87.15^\circ) = \frac{h\nu}{d},$$

$$N = 10^{11}, \quad n_2 = 0.702, \quad \varphi_2 = 2.85^\circ, \quad \vartheta = 10^4$$

$$d = 50.062 \text{ km}, \quad \alpha_E = 8.39 \times 10^{-6} \text{ [neper/m]}$$

$$At_E = e^{-0.84} = 0.432 \text{ [neper]}$$

$$At_E = -3.65 \text{ dB}$$

Sendo as perdas por atravessamento das camadas inferiores de:

$$At_{total_atravessamento} = At_D + At_E = -32,92 \text{ dB}$$

Através dos cálculos efectuados, relativamente à distância d , (percurso percorrido pelo raio) pode ver-se que por se ter um ângulo φ consideravelmente pequeno, essa distância é relativamente igual à espessura da camada considerada, tal como já referido no cálculo anterior, relativo às perdas na camada D.

2.7.2 Cálculo das atenuações considerando uma reflexão na camada F_2

Neste ponto, considera-se que a comunicação é feita com uma reflexão na camada F_2 , e como tal penetra nas camadas D, E e F_1 , onde vai haver refração.

Toma-se a altura virtual como sendo 300 km e o alcance da comunicação de 20 km.

Os procedimentos são os mesmos que para a situação anterior, ou seja, as atenuações na camada D e F são as mesmas, mas neste caso, como a reflexão se dá na camada F_2 , em vez de ser na F_1 , calcula-se as perdas por atravessamento até à camada F_1 , inclusivé.

- Cálculo da atenuação para a camada D: $At_D = -29,27 \text{ dB}$
- Cálculo da atenuação para a camada E: $At_E = -3,67 \text{ dB}$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..30)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..31)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..32)

- Cálculo da atenuação para a camada F_1 :

Considerando a espessura da camada de cerca de 60km, tem-se que:

$$At_{F1} = e^{-2\alpha_{F1}d}$$

$$\alpha_{F1} = \frac{q^2 N \vartheta}{2c\epsilon_0 m \omega^2} = \frac{\omega_p^2 \vartheta}{2c(\omega^2 + \vartheta^2)}$$

$$\sin(87.16^\circ) = \frac{h\nu}{d},$$

$$N = 10^{11}, \quad n_3 = 0.705, \quad \varphi_3 = 2.84^\circ, \quad \vartheta = 10^3$$

$$d = 60.074 \text{ km}, \quad \alpha_{F1} = 8.39 \times 10^{-7}$$

$$At_{F1} = e^{-0.1008} = 0.9041 \text{ [neper]}$$

$$At_{F1} = -0.438 \text{ dB}$$

Sendo as perdas por atravessamento das camadas inferiores, de:

$$At_{total_atravessamento} = At_D + At_E + At_{F1} = 1.337 \text{ [neper]}$$

$$At_{total_atravessamento} = At_D + At_E + At_{F1} = -33,38 \text{ dB}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..33)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..34)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..35)

3. Estudo teórico e simulação da antena NVIS

Neste capítulo através das equações de *Maxwell*, faz-se o estudo teórico em termos dos campos radiados, numa primeira fase para o dipolo eléctrico de *Hertz*, de seguida para o dipolo de meia onda, e por fim para a antena projectada.

3.1 Introdução

Para a comunicação por *NVIS*, em que se pretende que haja uma radiação máxima para ângulos elevados, entre cerca de 60° e cerca de 89° , tem-se como hipótese uma antena dipolar horizontal de meia onda, em que o seu comprimento eléctrico é metade do comprimento de onda ($\lambda/2$). Este tipo de antena interessa, pois apresenta um máximo de radiação, para ângulos de incidência muito elevados, tal como referido acima, assim como, é uma antena que possui um rendimento elevado (cerca de 90%), é de fácil construção e adaptação.

A resolução das equações de *Maxwell*, é possível de duas formas:

- Integrando directamente as equações de *Maxwell*, através de métodos numéricos;
- Resolvendo as equações de onda, obtendo os potenciais vectores, por integração, e através da condição de *Lorentz*, (esta condição relaciona os potenciais escalar φ e vector A , com a velocidade da luz e mostra como as grandezas eléctricas estão relacionadas com as magnéticas).

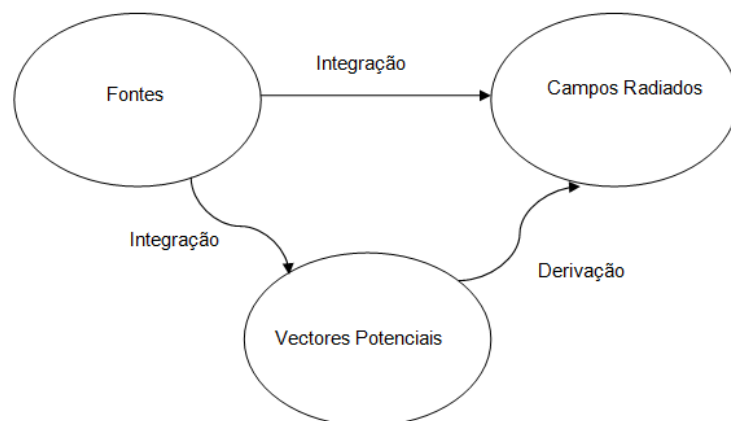


Figura 3.1 Resolução das equações de *Maxwell*

Sendo a condição de *Lorentz*, dada por:

$$\nabla \cdot A + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..1)

Optando pela forma b) descrita acima, e substituindo as relações anteriores nas restantes equações de *Maxwell*, e desde que se verifique a equação (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..1, obtém-se o seguinte sistema de equações de onda:

$$\nabla^2 A - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 J$$

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..2)
(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..3)

Posto isto, basta calcular um dos potenciais, como geralmente a densidade de corrente é sabida, e estando esta relacionada com o potencial vector *A*, vai-se determinar este. Sabe-se que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

As equações (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..2 e (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..3 têm como soluções:

$$A(P) = \frac{\mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{V'} J(r') e^{-jkr' \cdot \hat{e}_r} dV'$$

$$\varphi(P) = \frac{\epsilon_0}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{V'} \rho(r') e^{-jkr' \cdot \hat{e}_r} dV'$$

[21] [22](Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..4)
[21] [22](Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..5)

3.2 Dipolo de meia onda

O dipolo de meia onda, é denominado assim porque o comprimento dos condutores é metade de um comprimento de onda, e geralmente a alimentação é feita pelo centro. A impedância de entrada varia com a distância ao solo. A sua polarização pode ser horizontal ou vertical. A polarização de uma antena dipolo é definida pelo campo eléctrico. Se o campo eléctrico está na horizontal, a polarização do dipolo é horizontal, se o campo eléctrico está na vertical, então a polarização do dipolo é vertical.

Considerando: o campo na zona distante, em que $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$, o dipolo centrado na origem e alinhado com z , assim como $\hat{e}_d \equiv \hat{e}_z$, obtém-se para o potencial vector do dipolo orientado segundo z , dado pela seguinte expressão::

$$A_z = \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{-l}^l I_z(z') e^{jkz' \cos \theta} dz'$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..6)

Resultando nas seguintes coordenadas esféricas:

$$\begin{cases} A_r = A_z \cos \theta \\ A_\theta = -A_z \sin \theta \\ A_\phi = 0 \end{cases}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..7)

Como se está a considerar a zona distante, despreza-se $\frac{1}{k^2 r^2}$ assim como $\frac{1}{kr}$ em relação à unidade. Com isto $E_r = 0$, pois também se despreza relativamente a E_θ . Em função dos potenciais, os campos resultam então em:

$$E = 0_\phi, H_r = 0, H_\theta = 0$$

$$E_\theta = j \frac{Z_0 I_M}{2\pi r} e^{-jkr} \left[\frac{\cos(\frac{kl}{2} \cos \theta) - \cos(\frac{kl}{2})}{\sin \theta} \right]$$

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{Z_0} = j \frac{I_M}{2\pi r} e^{-jkr} \left[\frac{\cos(\frac{kl}{2} \cos \theta) - \cos(\frac{kl}{2})}{\sin \theta} \right]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..8)

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..9)

Em que $z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ corresponde à impedância característica da onda.

Através destas expressões pode-se ver que o campo eléctrico e o campo magnético são ortogonais entre si, assim como em relação à direcção da propagação definida por \hat{e}_r [17] [21] [22].

Em que I_M é a corrente máxima na antena e $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Considerando que $l = \frac{\lambda}{2}$, a distribuição da corrente é descrita pela seguinte expressão, e está representada na Figura 3.2:

$$I(z) = I_M \sin\left(\frac{\pi}{2} \pm kz\right) = I_M \cos kz$$

Os campos resultantes do dipolo de meia onda, são apresentados nas seguintes expressões:

$$E_\theta = j \frac{ZI_M e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right]$$

$$H_\phi = \frac{E_\theta}{Z} = j \frac{I_M e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..10)

[17] [22](Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..11)

[17] [22](Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..12)

A forma da distribuição de corrente aproximada do dipolo de meia onda é:

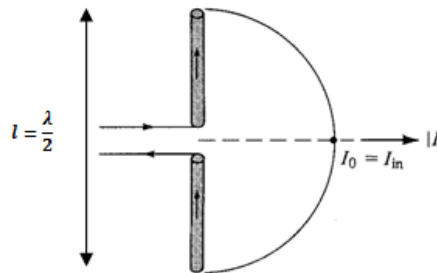


Figura 3.2 Distribuição aproximada de corrente no dipolo de meia onda

No caso do dipolo de meia onda em que $\lambda = \frac{\lambda}{2}$, o factor direccional é dado por

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..13)

A polarização de um campo radiado, depende da orientação da antena. Um dipolo orientado segundo zz , como representado na Figura 3.3, tem um campo com polarização linear vertical. Se o dipolo estiver orientado segundo o eixo xx ou yy , o campo terá polarização linear horizontal.

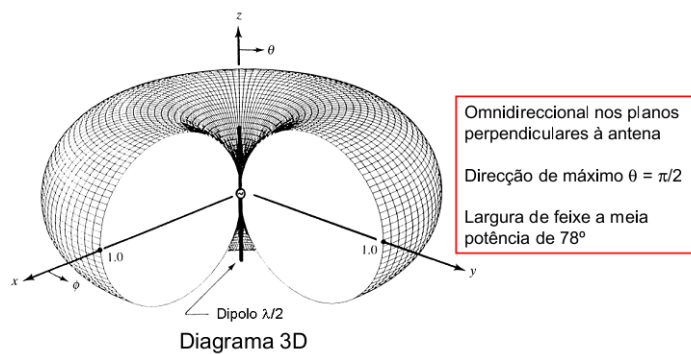


Figura 3.3 Diagrama de radiação do dipolo de meia onda

3.2.1 Simulação do diagrama de radiação do dipolo de meia onda

Através do ambiente *MMANA-GAL basic*, obtêm-se os seguintes diagramas de radiação para o dipolo de meia onda com uma frequência de 4 MHz, altura ao solo de 10 metros, e comprimento físico da antena de 18.75 metros:

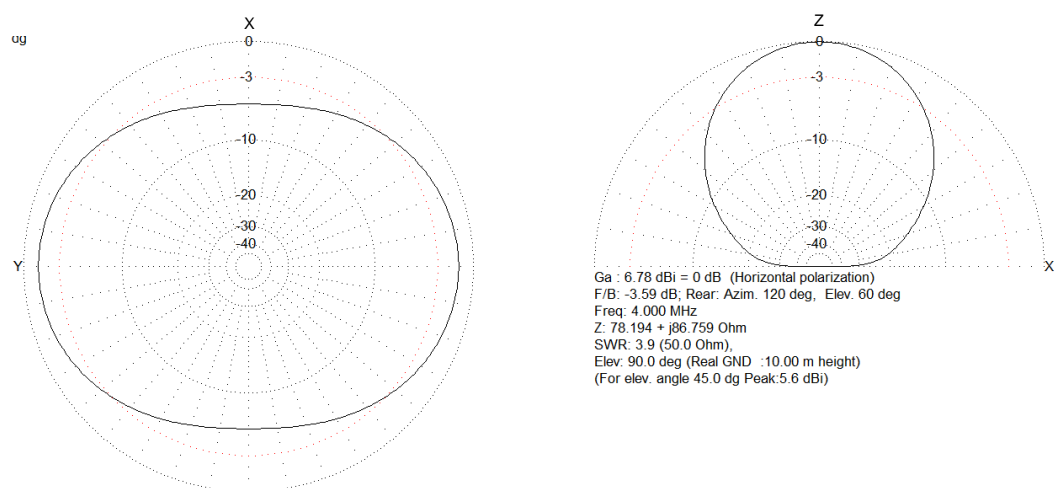


Figura 3.4 Diagramas de radiação para o dipolo de meia onda a 10 metros do solo

Representação 3D do diagrama para o dipolo de meia onda:

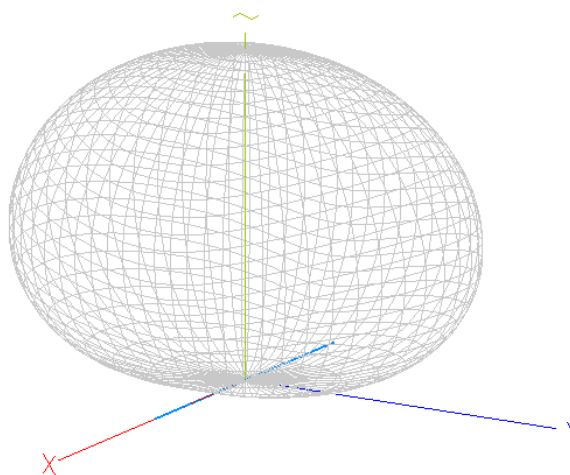


Figura 3.5 Diagrama radiação em 3D do dipolo a 10 metros do solo

3.3 Antena NVIS com uma única frequência de ressonância

Para a comunicação NVIS, como já foi referido, pretende-se que o rendimento da antena utilizada seja elevado, portanto vai-se escolher uma antena dipolar horizontal, nomeadamente de meia onda, em que o seu comprimento eléctrico é metade do comprimento de onda ($\lambda/2$). Esta antena é uma boa opção pois face ao dipolo de Hertz, o dipolo de meia onda tem uma resistência de radiação superior, logo a antena é mais eficiente. Pretende-se que a intensidade de radiação máxima, seja na direcção perpendicular à orientação do dipolo, portanto uma forma de se conseguir isso, será através de dois dipolos de meia onda, cruzados, em que a sua interacção irá resultar num diagrama de radiação máximo na vertical, no eixo dos zz , e com mínimos na direcção perpendicular a este.

Inicialmente faz-se o estudo e cálculo teórico dos campos gerados pelos dois dipolos de meia onda, em quadratura espacial e temporal, com um ângulo de 90° entre eles, e com as correntes desfasadas de 90° , e sendo os dipolos ressonantes à mesma frequência.

A Figura 3.6¹⁴ representa os campos de dois dipolos orientados segundo xx e segundo yy :

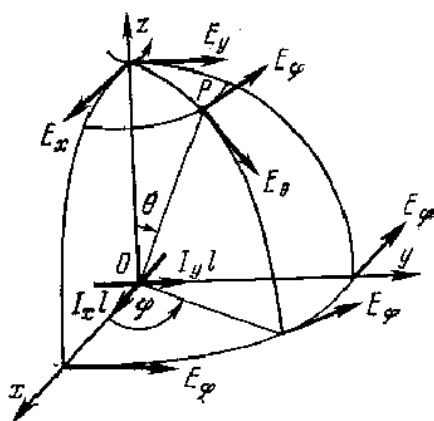


Figura 3.6 Representação dos campos dos dipolos cruzados

Considera-se uma frequência de 4 MHz. Esta frequência corresponde ao comprimento de onda $\lambda = 75 \text{ m}$ e em relação ao comprimento físico dos dipolos, a 37.5 m.

Depois de alguns cálculos e simplificações com as expressões da corrente e do potencial vector, (nos subcapítulos anteriores) chega-se à expressão geral do campo radiado na zona distante.

¹⁴ Fonte: Mateus, Alexandre C., Soluções W.K.B. para o cálculo da intensidade de campo na baixa ionosfera

Vai-se proceder ao cálculo dos campos, fazendo a soma vectorial dos campos radiados.

A expressão para o cálculo eléctrico quando se tem um agregado constituído por dois dipolos cruzados é a seguinte:

$$\vec{E} = \frac{jNi}{2\lambda r} Z_0 e^{-jkr} [(\hat{e}_d \times \hat{e}_r) \times \hat{e}_r]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..14)

Em que \hat{e}_d é a direcção em que está orientado o dipolo. Para facilitar os cálculos, define-se que $A = \frac{jNi}{2\lambda r} Z_0$, e substituindo na equação (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..14), a expressão fica:

$$\vec{E} = A e^{-jkr} [(\hat{e}_d \times \hat{e}_r) \times \hat{e}_r]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..15)

Primeiro vai-se calcular o campo para o dipolo orientado segundo yy, que resulta em:

$$\hat{e}_y \times \hat{e}_r = \cos \varphi \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..16)

Para o dipolo orientado segundo xx:

$$\hat{e}_x \times \hat{e}_r = -\sin \varphi \hat{e}_\varphi + \cos \theta \cos \varphi \hat{e}_\theta$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..17)

Os cálculos vectoriais para os dipolos, estão no anexo 1.

Fazendo as somas vectoriais, dos dipolos, segundo xx e segundo yy, e substituindo o valor de A, tem-se a seguinte expressão para o campo eléctrico total dos dipolos:

$$E_{total} = \frac{Ni}{2\lambda r} Z_0 [(-\sin \varphi + \cos \varphi) \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..18)

Em que θ corresponde à coordenada esférica vertical, e φ corresponde à coordenada esférica horizontal, como se demonstra na figura seguinte:

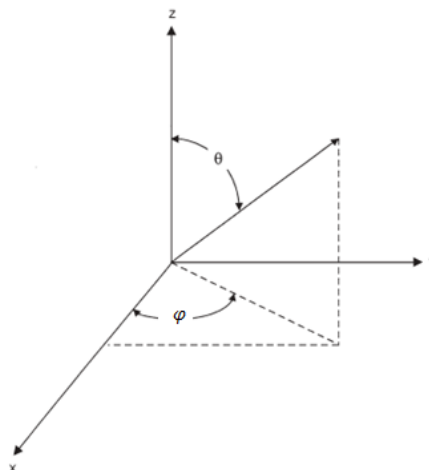


Figura 3.7 Coordenadas θ e φ

Sendo o momento electrodinâmico dado pela expressão:

$$Ni = I * h_e$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..19)

Para se obter um campo de referência, vão-se considerar os seguintes parâmetros. A altura efectiva $h_e = \lambda/\pi$, considerando uma corrente de $|I| = 0.5 A$, a uma distância de $r = 1 \text{ km}$ e impedância de $Z_o = 120\pi$, o módulo da expressão particular do campo eléctrico dos dipolos cruzados, é dado por:

$$|E_{\text{total}}| = 0.03 * \sqrt{(-\text{sen } \varphi + \cos \varphi)^2 + (\cos \theta * (\cos \varphi + \sin \varphi))^2}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..20)

3.3.1 Simulação do diagrama de radiação da antena NVIS com uma única frequência de ressonância

Neste subcapítulo vão ser apresentados os campos de radiação da antena NVIS para o plano horizontal e vertical, com uma única frequência de ressonância, sendo esta de 4 MHz. São simulados 2 dipolos cruzados, com 18.75m cada um. Elevados a 4 m do solo. Através do ambiente *MMANA-GAL basic*, obteve-se os diagramas horizontal e vertical, seguintes:

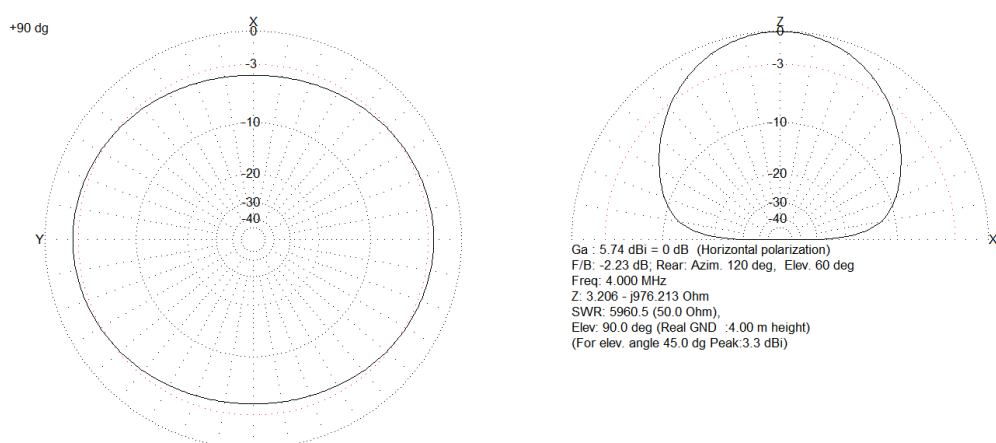


Figura 3.8 Diagramas horizontal e vertical para o dipolo ressonante a 4 MHz

A representação 3D corresponde ao seguinte:

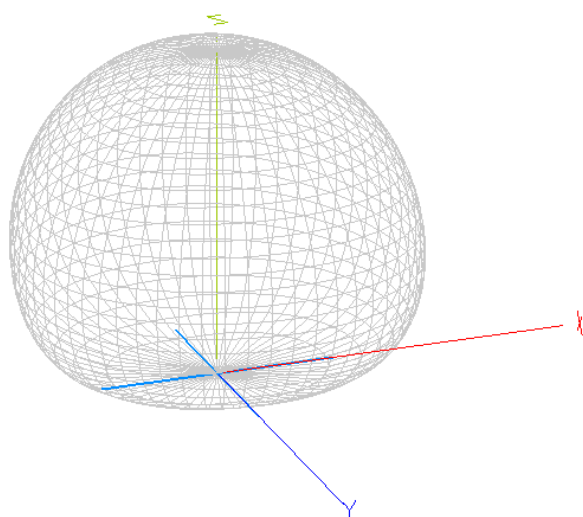


Figura 3.9 Representação 3D do dipolo ressonante a 4 MHz

3.4 Antena NVIS projectada

Neste subcapítulo considera-se a antena projectada construída neste trabalho, uma antena com uma gama de frequências situada na banda da onda curta (HF) entre os 4 MHz e os 6 MHz. O dipolo 1, estará sintonizado para os 4 MHz e o dipolo 2, para os 6 MHz em que f_1 corresponde a 4 MHz e f_2 corresponde a 6 MHz. Portanto, para o dipolo 1 ter-se-á um comprimento de onda de $\lambda_1 = 75 \text{ m}$ e para o dipolo 2 ter-se-á $\lambda_2 = 50 \text{ m}$, relativamente aos comprimentos físicos dos dipolos, estes serão de $l_1 = 37,5 \text{ m}$ e $l_2 = 25 \text{ m}$, respectivamente.

O campo eléctrico total será:

$$|E_{total}| = |E_1 + E_2|$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..21)

Para o dipolo 1, a expressão do campo será:

$$\vec{E}_1 = \frac{jNi_1}{2\lambda_1 r} Z_o e^{-jk_1 r} [(\hat{e}_d \times \hat{e}_r) \times \hat{e}_r]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..22)

O dipolo 1 está orientado segundo \hat{e}_d . O momento electrodinâmico é dado por:

$$Ni_1 = I * h_{e1}$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..23)

A altura efectiva do dipolo 1, é dada por:

$$h_{e1} = \frac{\lambda_1}{\pi} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} l_1 \right) \right)$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..24)

A expressão (Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..22) toma a seguinte forma:

$$\vec{E}_1 = \frac{jI}{2r\pi} Z_o \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} l_1 \right) \right) e^{-jk_1 r} [(\hat{e}_d \times \hat{e}_r) \times \hat{e}_r]$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..25)

Calcula-se o campo para o dipolo orientado segundo yy, que resulta em:

$$\hat{e}_y \times \hat{e}_r = \cos \varphi \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..26)

Para o dipolo orientado segundo xx:

$$\hat{e}_x \times \hat{e}_r = -\sin \varphi \hat{e}_\varphi + \cos \theta \cos \varphi \hat{e}_\theta$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..27)

Somando vectorialmente o módulo dos campos dos dipolos, segundo xx e segundo yy, tem-se a seguinte expressão para o campo eléctrico E_1 :

$$|E_1| = \left| \frac{IZo}{2\pi r} * \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right) \right] [(-\sin \varphi + \cos \varphi) \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta] \right|$$

(Error! Use the Home tab to apply Título 1 to the text that you want to appear here..28)

O campo eléctrico E_1 diz respeito à antena com o comprimento de $l_1 = 37.5$ m. Por forma a obter-se um campo de referência, vão-se considerar os seguintes parâmetros. Uma corrente $|I| = 0.5$ A, a uma distância de $r = 1$ km e impedância de $Z_0 = 120\pi$, que dão origem à seguinte expressão:

$$|E_1| = 0.03 * [1 - \cos\left(\frac{235.6}{\lambda_1}\right)] \sqrt{(-\sin \varphi + \cos \varphi)^2 + (\cos \theta * (\cos \varphi + \sin \varphi))^2}$$

A constante A_1 representa a amplitude relativa do campo, e define-se por:

$$A_1 = 0.03 * (1 - \cos\left(\frac{235.6}{\lambda_1}\right))$$

No caso de E_2 , em que $l_2 = 25$ m e considerando os mesmos parâmetros tidos em conta para E_1 , a expressão do campo tem a seguinte forma:

$$|E_2| = 0.03 * [1 - \cos\left(\frac{157.08}{\lambda_2}\right)] \sqrt{(-\sin \varphi + \cos \varphi)^2 + (\cos \theta * (\cos \varphi + \sin \varphi))^2}$$

A constante A_2 representa a amplitude relativa do campo, e define-se por:

$$A_2 = 0.03 * (1 - \cos\left(\frac{157.08}{\lambda_2}\right))$$

Variando a frequência entre 4 MHz e 6 MHz, obtêm-se os seguintes valores para as amplitudes relativas A_1 do campo para o dipolo 1 e A_2 para o dipolo 2, como se representa na seguinte tabela:

Tabela 3.1 Valores de amplitude dos dipolos em relação à frequência

Frequência (MHz)	A_1	A_2
4	0,060	0,045
4,1	0,060	0,046
4,2	0,060	0,048
4,3	0,059	0,049
4,4	0,059	0,050
4,5	0,058	0,051
4,6	0,057	0,052
4,7	0,056	0,053
4,8	0,054	0,054
4,9	0,053	0,055
5	0,051	0,056

5,1	0,049	0,057
5,2	0,048	0,057
5,3	0,046	0,058
5,4	0,044	0,059
5,5	0,041	0,059
5,6	0,039	0,059
5,7	0,037	0,060
5,8	0,035	0,060
5,9	0,032	0,060
6	0,030	0,060

Na figura seguinte, é representada a amplitude relativa do campo em função da frequência, retirada da tabela anterior:

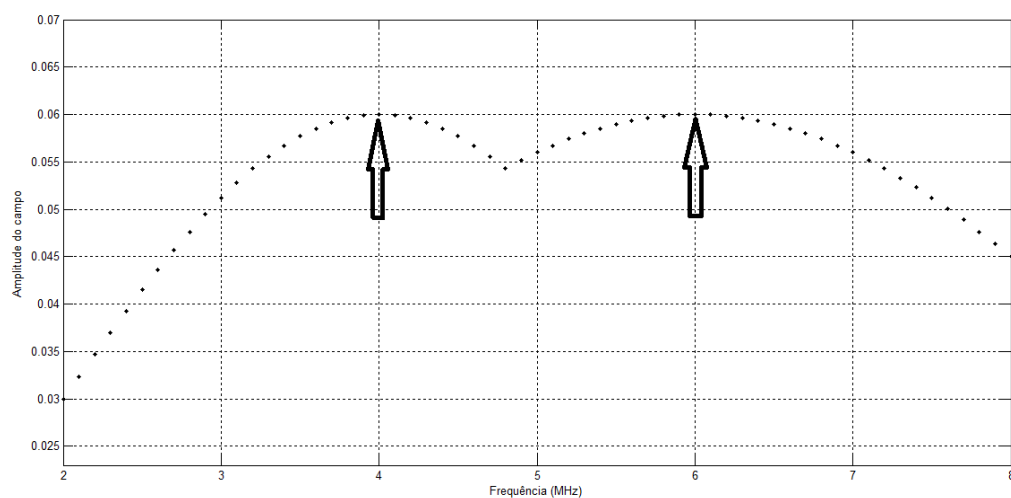


Figura 3.10 Representação da amplitude relativa do campo em função da frequência

Como era de esperar, nas frequências em que a antena é ressonante (4 MHz e 6 MHz) a amplitude relativa do campo atinge os valores máximos

3.4.1 Simulação do diagrama de radiação da antena NVIS projectada

Neste subcapítulo, com auxílio do ambiente *MMANA GAL basic*, vão ser apresentados os diagramas de radiação da antena *NVIS* projectada, elevada a 4 metros do solo, em que o dipolo 1 tem 18.75 metros e o dipolo 2 tem 12.5 metros, relativos ao plano horizontal, vertical e 3D.

Vão ser representados os campos do dipolo para as frequências de 4 MHz, 5 MHz e 6 MHz.

Para a frequência de 4 MHz, resultam no seguinte:

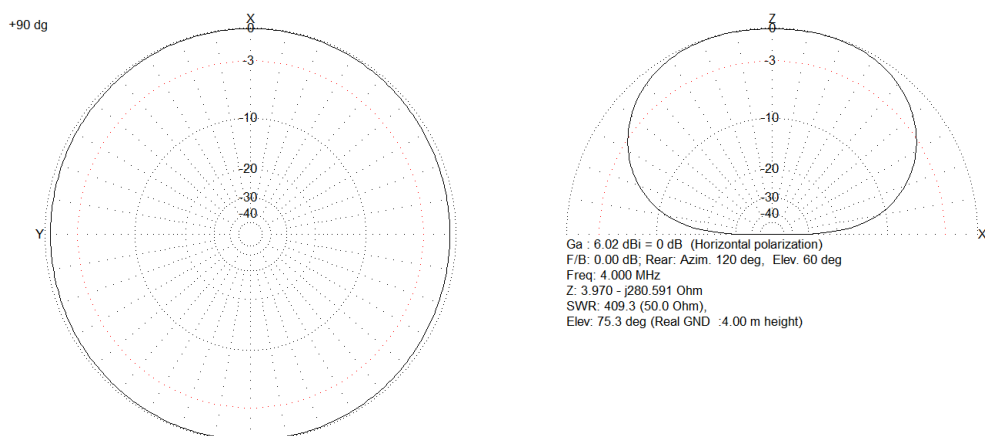


Figura 3.11 Diagramas horizontal e vertical dos campos, para 4MHz, a 4 metros do solo

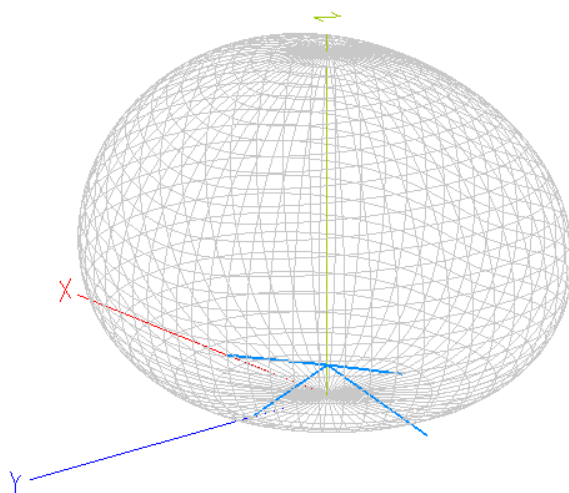


Figura 3.12 Diagrama para 4 MHz em 3D

É apresentado também o *SWR* para a frequência ressonante, dos 4 MHz.

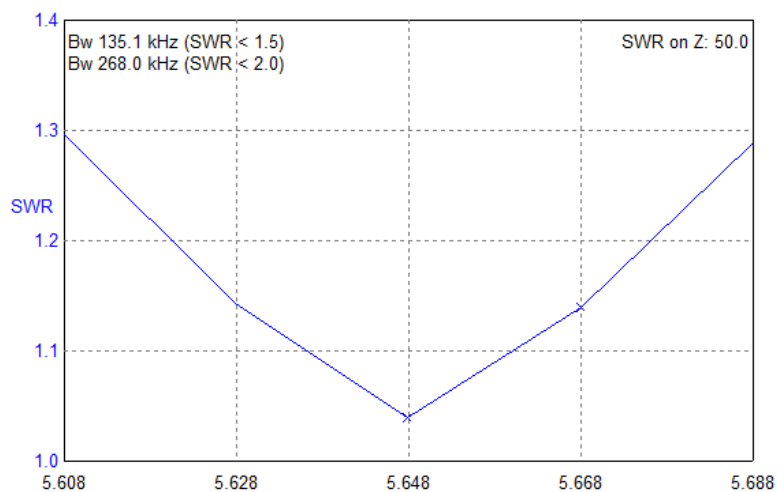


Figura 3.13 Diagrama representando o *SWR* para a frequência ressonante quando $f = 4$ MHz

De seguida são apresentados os diagramas de radiação para os 5 MHz:

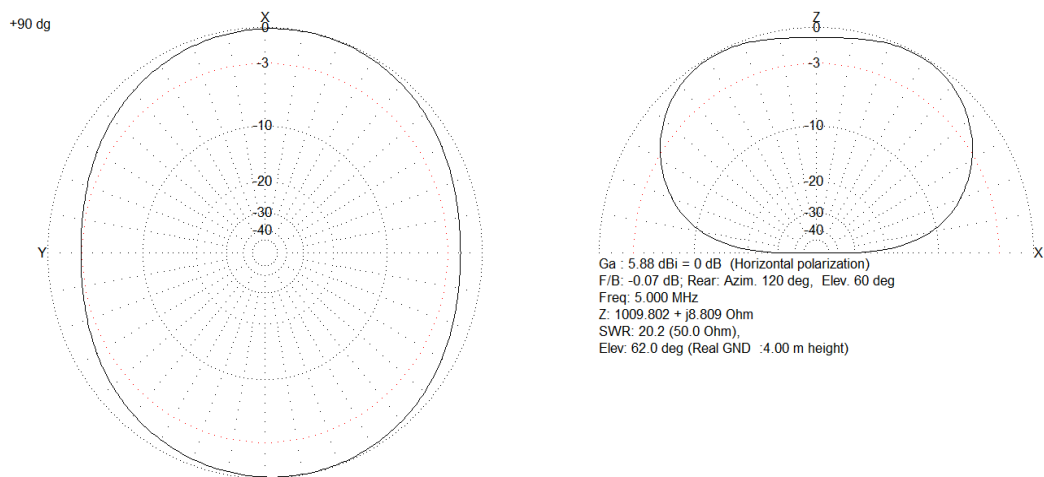


Figura 3.14 Diagramas horizontal e vertical dos campos, para 5 MHz, a 4 metros do solo

A seguinte figura ilustra o diagrama de radiação em 3D para a frequência de 5 MHz:

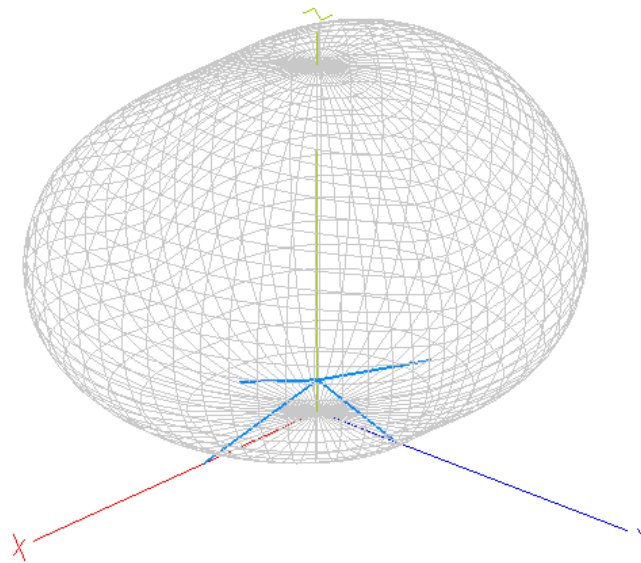


Figura 3.15 Diagrama para 5 MHz em 3D

De seguida é apresentado o *SWR* para a frequência ressonante a 5 MHz:

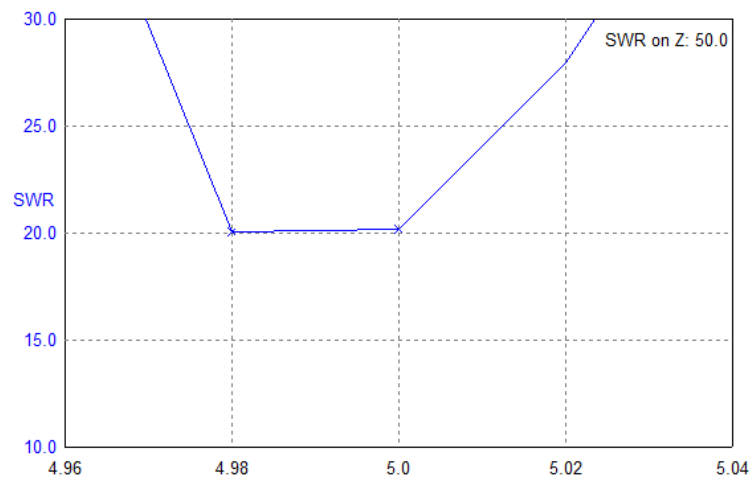


Figura 3.16 Diagrama representando o *SWR* para a frequência ressonante quando $f = 5$ MHz

Por último representam-se os diagramas de radiação para a frequência de 6 MHz:

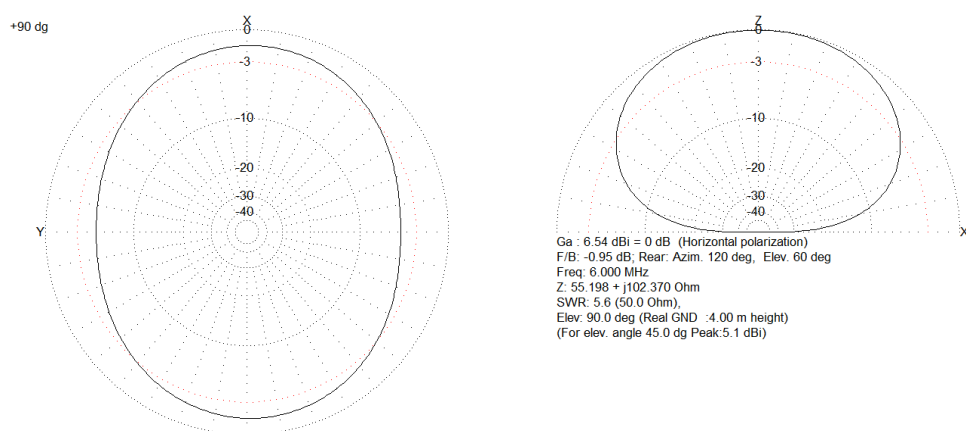


Figura 3.17 Diagramas horizontal e vertical dos campos, para 6 MHz, a 4 metros do solo

De seguida, é apresentado o diagrama de radiação em 3D para a frequência de 6 MHz:

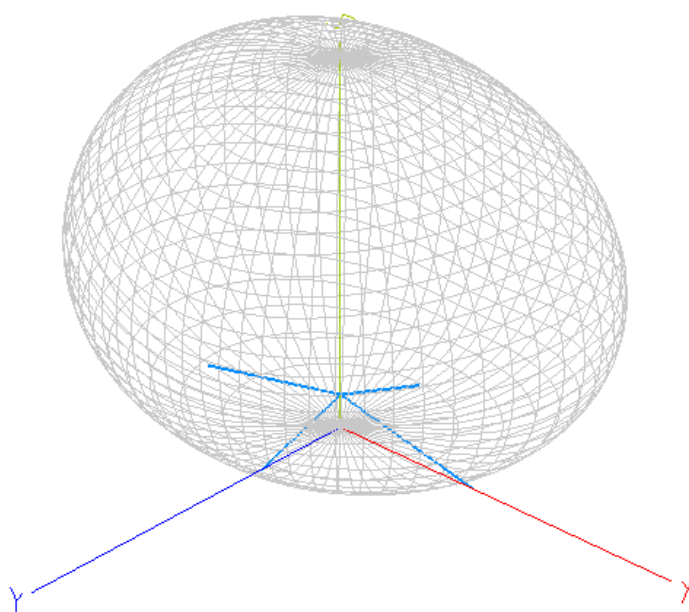


Figura 3.18 Diagrama para 6 MHz em 3D

A seguir representa-se o SWR da frequência ressonante para 6 MHz:

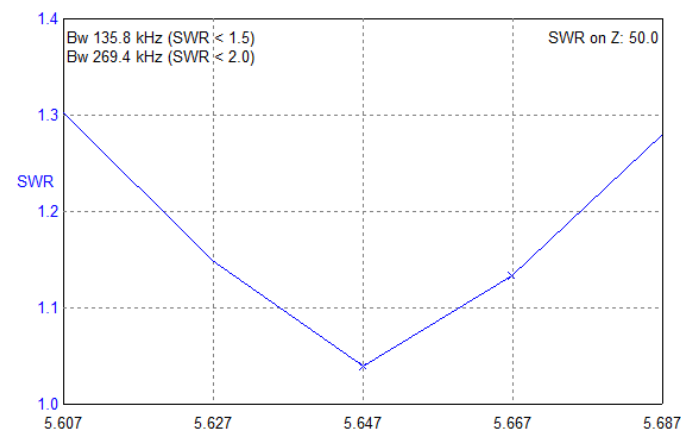


Figura 3.19 Diagrama representando o SWR para a frequência ressonante quando f = 6 MHz

De seguida representa-se o diagrama de radiação para as 3 frequências anteriores de forma a comparar-se estas:

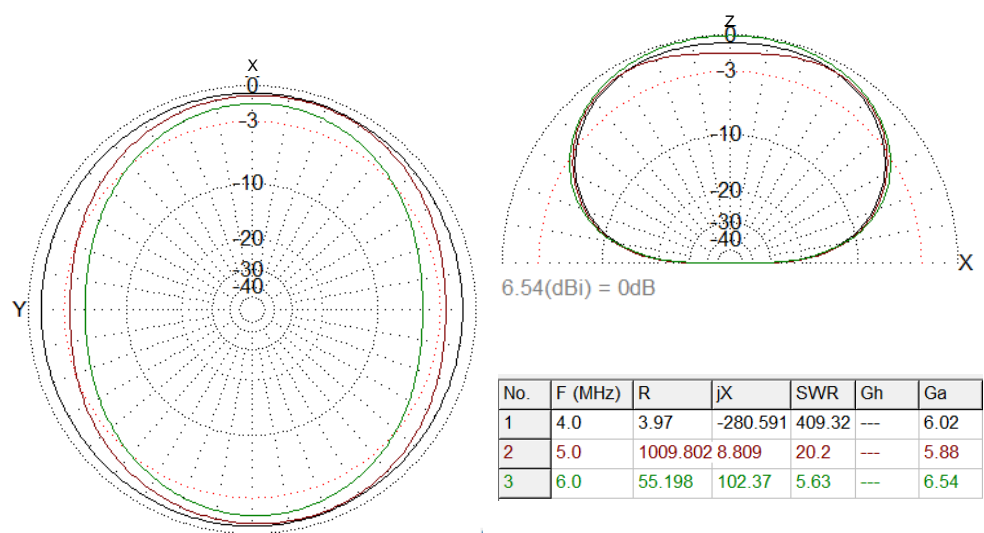


Figura 3.20 Diagramas de radiação para as frequências de 4 MHz, 5 MHz e 6 MHz

4. Construção da antena *NVIS MR13* e ensaios

4.1 Material utilizado

Para construir a antena foi utilizado diverso material. Parte desse material, foi adquirido pela Academia Militar, outra parte foi cedida pela *EID* (empresa que apoiou a dissertação na construção da antena), e outra parte ainda foi gentilmente oferecida pelo Eng.º. Mariano José Ferreira Gonçalves, assim como a utilização da sua oficina que foi o local de construção, caracterização da antena e ensaios.

Na construção da antena utilizou-se o seguinte material:

- 1 ficha *SO239* fêmea painel com base
- 1 ficha *PL-RG58* macho
- 4 fichas de alvéolo fêmea
- 4 fichas monopulares macho com parafuso
- 4 mosquetões pretos
- Tubo de *PVC* com anel
- 2 Tampas de *PVC*
- 2 metros de manga térmica retráctil com resina semi rígida
- 10 metros de cordão de *polyester* de 2.5mm
- 25 metros de cabo coaxial *RG58*
- 65 metros de fio de antena 999-2011 *Ormiston Wire*

No anexo 2 estão inseridas imagens do material utilizado bem como as respectivas fichas técnicas.

4.2 Construção da antena

A tipologia da antena consiste em dois dipolos cruzados em v invertido, em que os braços dos dipolos formam entre si, um ângulo de cerca de 120° , diminuindo a impedância característica de ambas as antenas (f_1 e f_2) de cerca de $75\ \text{ohm}$, para cerca de $50\ \text{ohm}$.

A antena construída designa-se por Antena *NVIS MR13*. Classifica-se como um conjunto composto por dois dipolos de meia onda, com frequências de ressonância diferentes, em que $f_1 = 4\ \text{MHz}$, a frequência de ressonância para o dipolo com o comprimento físico de $l_1 = 37,5\ \text{metros}$ (dipolo 1), e $f_2 = 6\ \text{MHz}$ corresponde à frequência de ressonância do segundo dipolo (dipolo 2) que tem um comprimento físico $l_2 = 25\ \text{metros}$.



Figura 4.1 Antena *NVIS MR13* espiada

A construção da antena pode ser dividida em duas partes distintas, a parte das ligações internas dos dipolos, do ponto de vista da sua alimentação, e a parte dos dipolos em si.

Relativamente à primeira parte, os braços dos dipolos são ligados de forma simétrica e combinados à mesma linha de transmissão (cabo coaxial), em que cada braço do dipolo 1 está ligado a um braço do dipolo 2, ficando os dipolos ligados em paralelo entre si, como se pode observar na Figura 4.2.

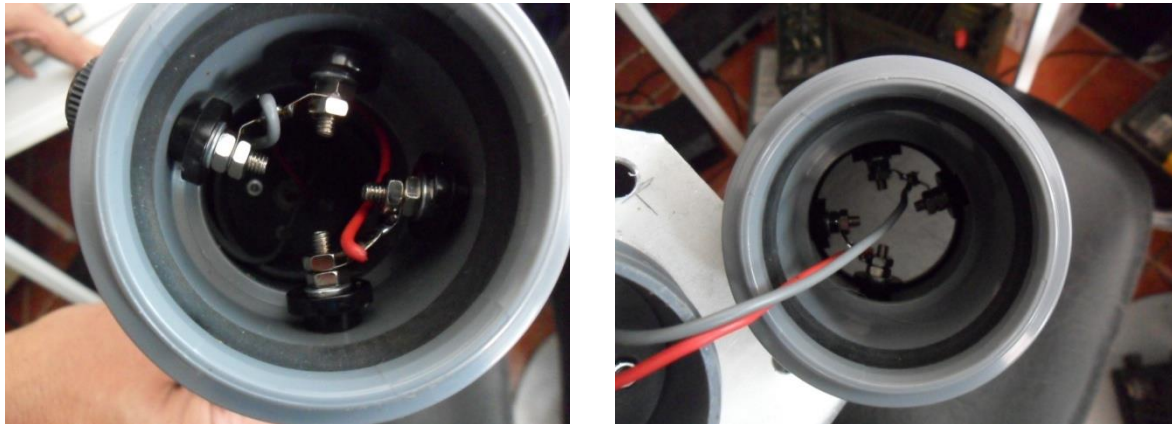


Figura 4.2 Vistas superior (à esquerda) e inferior (à direita) da ligação entre os dipolos

Estas ligações são efectuadas dentro de uma estrutura em *PVC* com cerca de 10 cm de comprimento, fechado por cima e por baixo, através de duas tampas. A estrutura de *PVC* vai oferecer protecção às ligações, e vai permitir que os braços dos dipolos sejam alimentados através das fichas de alvéolo inseridas na estrutura e das fichas monopolares ligadas às extremidades dos braços dos dipolos. No fundo da estrutura de *PVC*, é aparafusada uma base de metal, e a esta, uma ficha *PL259* fêmea. A antena é alimentada através dessa ficha *PL259* à qual é ligado o cabo coaxial *RG58* que vem do rádio. As ligações dos dipolos à ficha *PL259* têm o mesmo comprimento, em que uma delas é feita ao condutor central da ficha e a outra liga ao terminal correspondente à malha da ficha. Como o tamanho do fio utilizado é de cerca de 10 cm, valor que é bastante menor que o comprimento de onda de emissão, este factor não vai ter influência na ligação dos dipolos.

Efectuadas as ligações da alimentação da antena, a estrutura de *PVC* e a base de suporte, têm a configuração apresentada na Figura 4.3.



Figura 4.3 Resultado final das ligações para a alimentação da antena

A segunda parte da construção da antena, diz respeito aos braços dos dipolos. Estes são feitos com fio de antena da *Ormiston Wire Limited* com a referência 999-2011 (especificações técnicas (*datasheet*) no anexo 2), fornecido pela *EID*. As quatro ligações do fio de antena, ou seja, dos braços dos dipolos ao tubo de *PVC*, são feitas através de fichas monopolares ligadas a fichas de painel (a preto na Figura 4.4) existentes no tubo. As extremidades dos dipolos que ligam às fichas de painel, estão unidas a um cordão de *polyester*, através de um nó, e reforçadas com manga térmica, que por sua vez são fixadas nos furos da base metálica através de mosquetões.



Figura 4.4 Base metálica da antena

A instalação da antena relativamente ao solo faz-se com uma altura igual ou inferior a $0,1\lambda$ de modo a ter-se uma solução de compromisso nos ganhos de radiação vertical, perto de 90° , em função dos dois comprimentos de onda (λ) em que a antena funciona, para f_1 e f_2 . Nestas condições a impedância é inferior a 50 ohm, devido à proximidade do solo (aproximadamente 15 a 30 ohm), desadaptação que é compensada pela Unidade Automática de Sintonia (*ATU - Automatic Tuning Unit*) do transmissor.



Figura 4.5 Pormenor da união entre o fio de antena e o cordão, e mosquetão

As extremidades dos dipolos (próximas do solo) são unidas a um cordão de *polyester*, através de um nó envolvido por uma manga térmica; este cordão, funciona como elemento isolador na outra extremidade, terminando por um laço, sendo este fixado ao solo através de estacas.

Construiu-se com cabo coaxial *RG316* (2.5 mm), um *balun* toroidal (de corrente), com uma relação de 1:1, que permite passar de uma configuração não equilibrada para equilibrada, e confere à antena uma característica de radiação simétrica, em ambos os braços do dipolo. Este *balun* tem 22 espiras, e permite adaptar a antena para uma gama de frequências conveniente. A figura seguinte ilustra o *balun*:



Figura 4.6 *Balun* toroidal de 1:1

4.2.1 Caracterização da antena

Para efectuar a medida dos parâmetros da antena, utilizou-se o analisador de redes, *HP 8752C Network Analyzer* (300kHz-1.3GHz). Os parâmetros medidos foram a frequência de ressonância, a Relação de Onda Estacionária (ROE), também conhecida do Inglês, por *Standing Wave Ratio (SWR)*, e o parâmetro conhecido por *return loss* (em inglês),

A antena foi projectada para trabalhar entre as frequências de 4 e 6 MHz. As frequências de ressonância medidas no analisador de redes, foram respectivamente $f_1 = 3.52 \text{ MHz}$, com uma ROE de 1.14, e $f_2 = 5.6 \text{ MHz}$, com uma ROE de 1.11.

A discrepância entre os valores teóricos e os valores experimentais das frequências, pode ter múltiplas causas, relacionadas não só com a configuração final da antena, mas também com a estrutura do cabo utilizado na construção dos braços do dipolo. As figuras seguintes, ilustram a estrutura do cabo utilizado para fazer os braços dos dipolos. A Figura 4.7 mostra como é constituída a malha condutora e a Figura 4.8 demonstra o isolamento interior em teflon:



Figura 4.7 Pormenor da malha do cabo

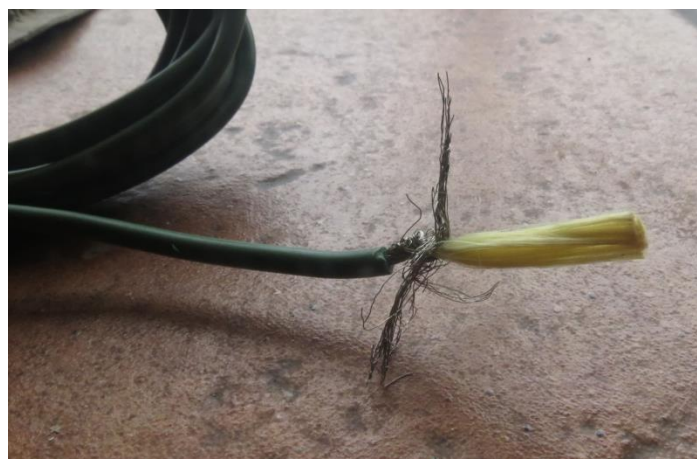


Figura 4.8 Pormenor do isolante em teflon, do cabo

Os valores da ROE são bastante satisfatórios pois estão muito próximos da unidade, que seria o valor ideal de adaptação. Na Figura 4.9 e na Figura 4.11, podem ler-se os valores das frequências de ressonância, medidos no analisador de redes

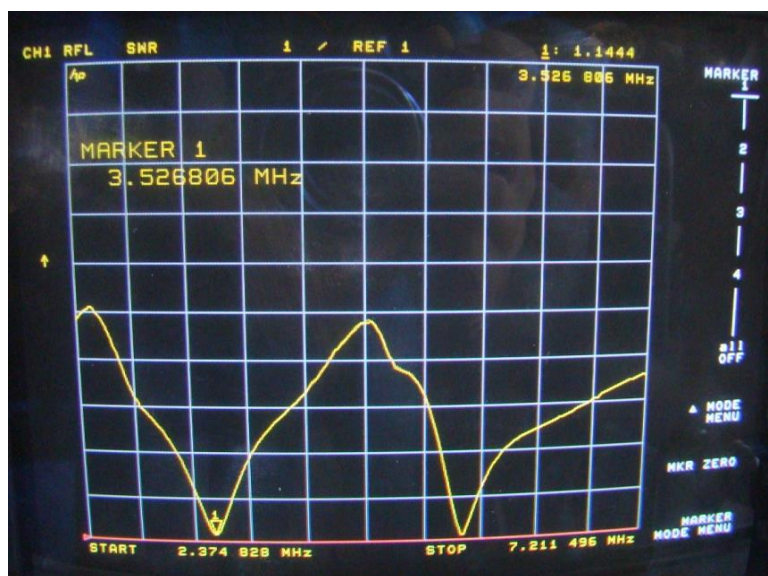


Figura 4.9 Leitura da frequência de ressonância para f_1 , medida no Network Analyzer

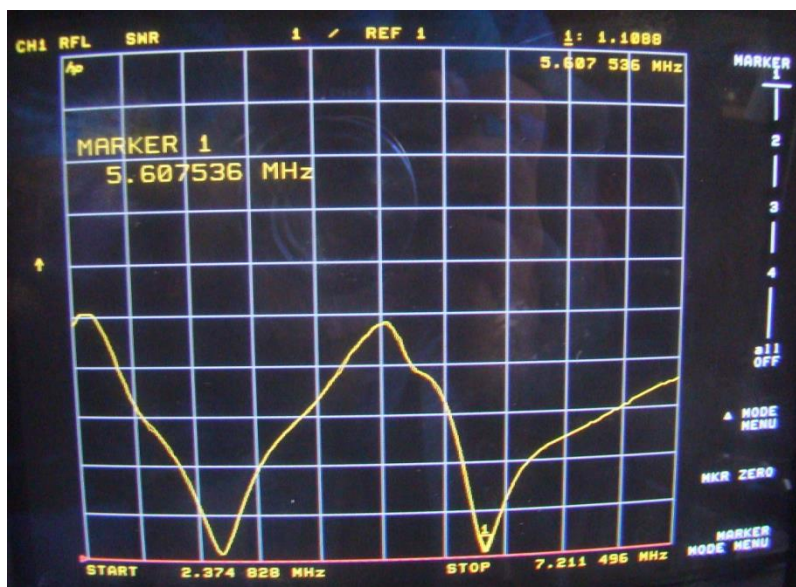


Figura 4.10 Leitura da frequência de ressonância para f_2 , medida no Network Analyzer

Procedeu-se igualmente à caracterização do *balun* construído, no *analizador de redes* tendo-se obtido valores do coeficiente de reflexão entre os 2 MHz e os 50 MHz, de aproximadamente -32 dB, e uma ROE de cerca de 1,055:1. As perdas de inserção nesta banda de frequência situam-se entre -0.15 dB e -0.3 dB.

Concluiu-se assim que a introdução do *balun*, conduz a uma melhoria do nível do sinal no receptor, de cerca de 10 a 15 dB, e melhorando a simetria dos lobos de radiação.

Através do *Rohde & Schwarz CMTA54 Radio Communication* com gerador de radiofrequência, procedeu-se à calibração do *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* do rádio *IC-706MKIIG* da *ICOM*, injectando sinal na entrada do *front end* (circuito RF) do receptor. Incrementou-se um sinal de RF de referência entre o *noise floor* (valor inferior da escala) do receptor, sendo este de -125 dBm, até ao valor máximo de -60 dBm, por forma a calibrar a escala de medida do *RSSI*. A Tabela 4.1 contém os valores da escala calibrada, correspondentes.

Tabela 4.1 Valores da escala calibrados, do receptor ICOM

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60
Escala (dBm)	-103	-102	-101	-100	-99,5	-96,3	-91	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-54	-46

4.3 Ensaaios

Neste subcapítulo são descritos os ensaios efectuados, por forma a testar a ligação *NVIS*, para a qual a antena construída foi projectada. São apresentados alguns perfis potenciais para os ensaios, e são apresentados os ensaios realizados, classificadas as ligações e o equipamento utilizado para os ensaios..

4.3.1 Perfis do terreno

O perfil que se pretende para a comunicação *NVIS*, é um perfil com um ou mais obstáculos e que diste de cerca de 20 km a cerca de 120 km, entre o emissor e o receptor. O obstáculo tem de ter uma altitude mínima de cerca de 300 metros, por forma a garantir, que apenas exista comunicação *NVIS*. Foram estudados vários tipos de perfis, nas zonas de Setúbal, Lisboa e Sintra.

De seguida são apresentados os potenciais perfis para a execução dos ensaios.

Ligação NVIS Academia Militar (Amadora) – EID (Lazarim)

Esta ligação começa na Academia Militar, na Amadora, e termina na sede da EID, em Lazarim. Dista cerca de 12 km, entre extremos.

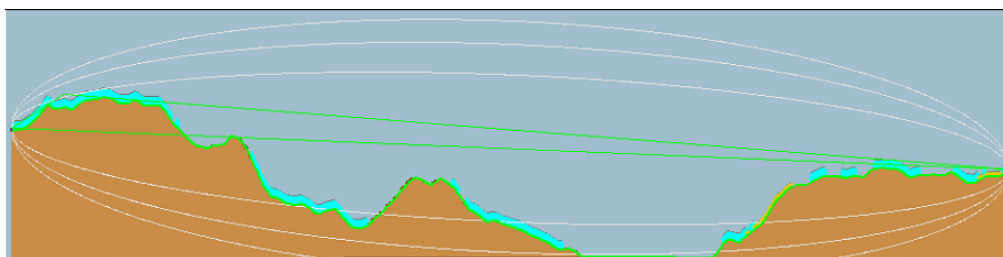


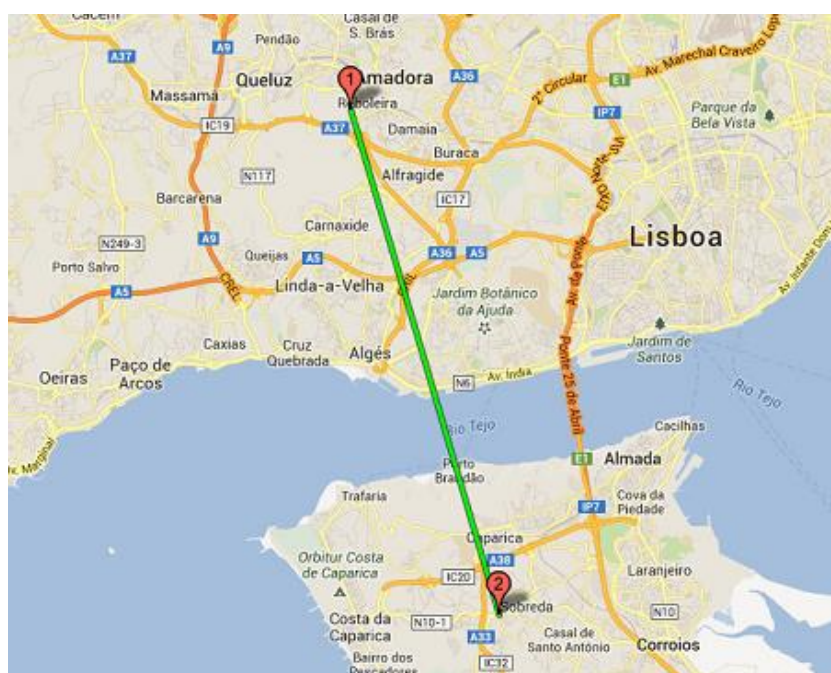
Figura 4.11 Perfil entre Amadora e Lazarim

A Figura 3.3 Diagrama de radiação do dipolo de meia onda, apresenta o perfil do terreno. Em termos de obstáculos à comunicação, não existe nada acentuado, pois o maior obstáculo, tem apenas cerca de 40 metros de altura, como tal, não garante a atenuação da onda de solo necessária para se garantir propagação NVIS.

A tabela seguinte, contém as características da ligação.

Tabela 4.2 Características da ligação Amadora (Academia Militar) - Lazarim

Academia Militar (Amadora)		Lazarim	
Latitude	38.751272°	Latitude	38.647243°
Longitude	-9.236069°	Longitude	-9.196930°
Altura da antena (m)	4	Altura da antena (m)	4
Altura em relação ao mar (m)	136.8	Altura em relação ao mar (m)	92.7
Distância (km)		12.056	
Ângulo de elevação		88.5°	



Ligação NVIS Academia Militar (Amadora) – Cabo da Roca

Esta ligação, situa-se entre a Academia Militar, na Amadora, e o Cabo da Roca, na zona de Sintra. Possui obstáculos suficientemente acentuados, com cerca de 400 metros de altitude, que garantem que se tem comunicação NVIS, como se pode observar pela Figura 4.13.

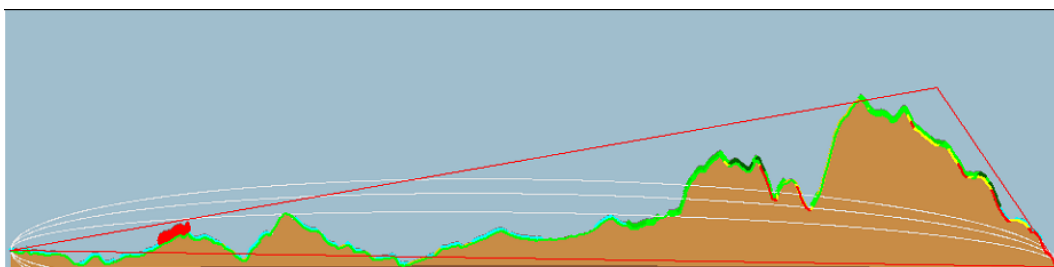


Figura 4.13 Perfil entre Amadora e Cabo da Roca

Relativamente à distância, no caso estudado, é uma distância que interessa, do ponto de vista da distância mínima definida, para a comunicação NVIS, em relação à antena projectada.

A tabela seguinte contém as características da ligação.

Tabela 4.3 Características da ligação Academia Militar (Amadora) – Cabo da Roca

Academia Militar (Amadora)		Cabo da Roca	
Latitude	38.751272	Latitude	38.778978°
Longitude	-9.236069	Longitude	-9.491501°
Altura da antena (m)	4	Altura da antena (m)	4
Altura em relação ao mar (m)	136.8	Altura em relação ao mar (m)	97.8
Distância (km)		22.35	
Ângulo de elevação		87.4°	

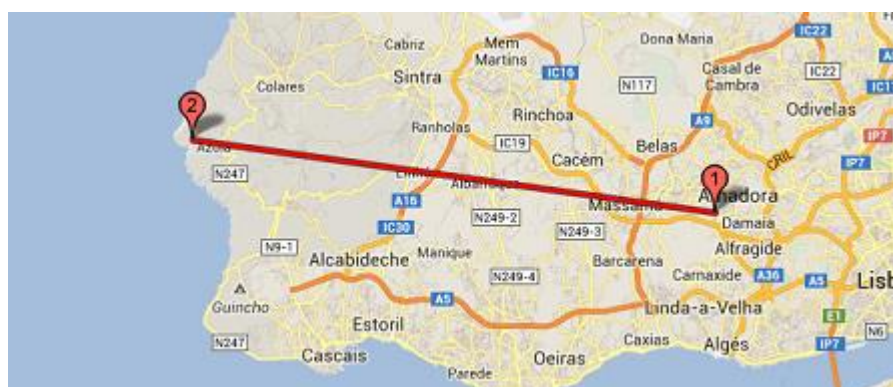


Figura 4.14 Ligação Academia Militar – Cabo da Roca, obtida através do Google Maps

Ligação NVIS Barcarena (Oeiras) – Cheleiros (Mafra)

Ligação entre Barcarena, no concelho de Oeiras, e Cheleiros, no concelho de Mafra.

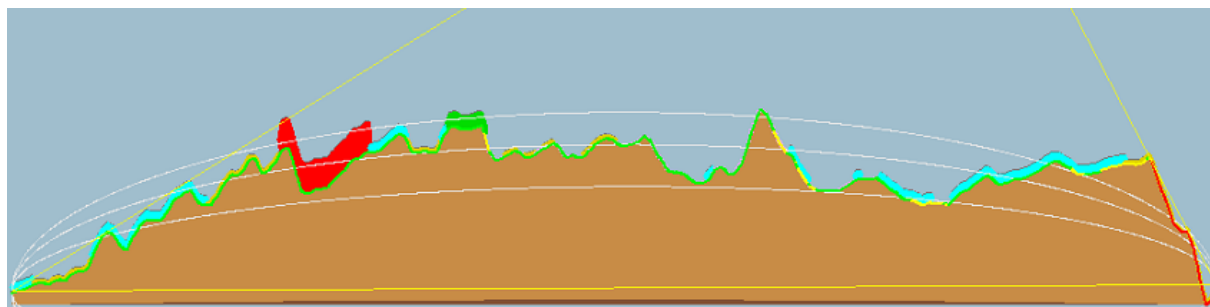


Figura 4.15 Perfil entre Barcarena e Cheleiros

O perfil apresentado, contém diversos obstáculos naturais, da ordem dos 500 metros de altitude, e dista entre o emissor e receptor, aproximadamente 18 km.

Tabela 4.4 Características da ligação Barcarena - Cheleiros

Barcarena (Oeiras)		Cheleiros (Mafra)	
Latitude	38.731858°	Latitude	38.887091°
Longitude	-9.280915°	Longitude	-9.335461°
Altura da antena (m)	4	Altura da antena (m)	4
Altura em relação ao mar (m)	52	Altura em relação ao mar (m)	57.6
Distância (km)		17.897	
Ângulo de elevação		88.4°	

A figura seguinte, representa o percurso da ligação.

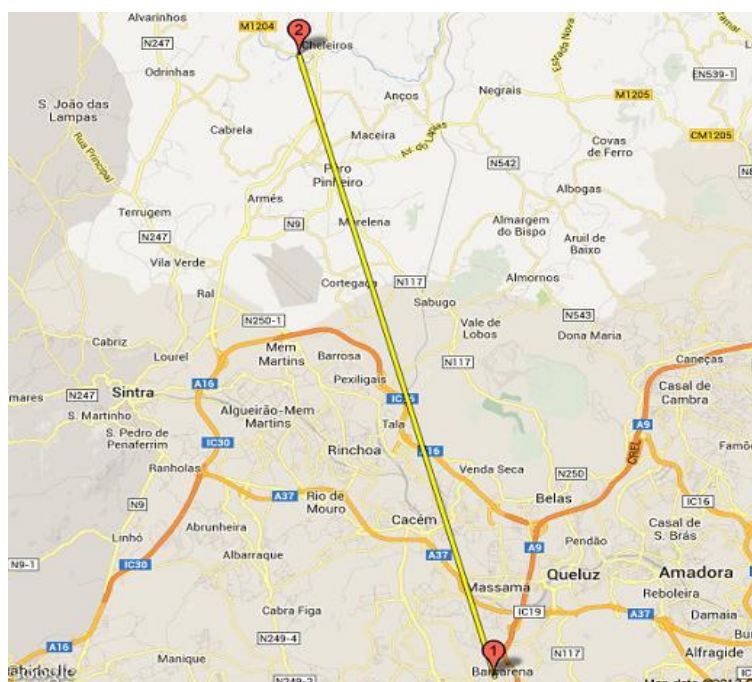


Figura 4.16 Ligação Barcarena – Cheleiros, obtida através do Google Maps

4.3.2 Escolha do local de testes

Como já referido no subcapítulo 4.3.1, o tipo de perfil para a antena construída, e de acordo com o pretendido, é um perfil que possui um ou mais obstáculos no seu percurso, com uma altitude da ordem de 400 metros, por forma a garantir que a onda de superfície não se propague e que exista apenas comunicação por NVIS. De acordo com a tipologia da antena estudada e posteriormente construída, bem como os ângulos de elevação, definiram-se distâncias mínimas e máximas para o estabelecimento da comunicação, sendo a mínima de 20 km e a máxima de 120 km.

Dos vários perfis apresentados, escolheu-se a ligação entre Barcarena (Oeiras) e Cheleiros (Mafra) para se efectuar os ensaios de comunicação por NVIS. Esta ligação apresenta obstáculos da ordem dos 500 metros de altitude, e dista entre os seus extremos, cerca de 18 km. É conveniente que se efectue a comunicação, a uma distância próxima da distância mínima considerada, 20 km, em que o ângulo de elevação é máximo. Este perfil foi também escolhido tendo em conta o factor logístico, pois Barcarena é o local onde a antena foi construída, e de acordo com os meios que se dispõe, e pelo facto de um dos extremos da ligação ser este local, facilita a execução dos ensaios.

Considerando todos estes aspectos, definiu-se a ligação Barcarena – Cheleiros, como sendo a ligação mais complexa (menor distância, maior elevação e orografia do terreno) escolhida para efectuar os ensaios.

4.3.3 Equipamento utilizado para os ensaios

Para se operacionalizar a ligação, os testes de propagação e medidas, foram empregues os seguintes sistemas, entre rádios e equipamentos de medida, listados de seguida:

- Antena construída NVIS MR13
- 2 antenas de referência marca Harris modelo RF-1936/38
- 1 emissor-receptor com unidade de sintonia de antena IC-706MKIIG
- 2 emissores-receptores (Combat Net Radio), modelo PRC 525 HF/VHF
- Antena multifilar NVIS, para (Combat Net Radio) PRC 525
- Comutador coaxial de 4 entradas
- Analisador de redes HP 8752C Network Analyzer (300kHz-1.3GHz)
- Radio Communication Test Set, CMTA54, Rohde & Schwarz

As imagens do equipamento utilizado nos ensaios bem como as suas características técnicas, encontram-se no anexo 3.

4.3.4 Montagens dos ensaios

Para se efectuar o teste da comunicação por *NVIS*, por forma a poder caracterizar-se a ligação e as antenas efectuou-se uma ligação bidireccional, entre duas antenas *Harris RF-1936/38*, cedidas pelo Corpo de Fuzileiros da Marinha. São antenas portáteis, de fácil montagem, constituídas por dois dipolos cruzados. Utilizam a comunicação por *NVIS*, e podem comunicar entre os 10 km e os 400 km. O mastro é constituído por várias secções coaxiais, constituindo-se na linha de transmissão que alimenta a antena. Na Figura 4.17 pode ver-se o pormenor da linha coaxial macho e fêmea, na extremidade do mastro. As características de campo, e diagramas de radiação, são idênticas, portanto obtendo a leitura dos campos resultantes e potências recebidas entre estas, é possível determinar um conjunto de valores de referência para se comparar quando a ligação for feita entre uma das antenas *Harris* e a antena *NVIS MR13*.



Figura 4.17 Pormenor da linha coaxial macho (à esquerda) e fêmea (à direita) dentro do mastro



Figura 4.18 Comutador coaxial de 4 entradas

São ligadas em simultâneo as antenas, *NVIS MR13* e uma das antenas *Harris*, ao rádio *IC-706MKIIG* da *ICOM*, através de um comutador. Este comutador permite seleccionar até 4 linhas de entrada distintas, como se pode observar na Figura 4.18. Por fim, vai ser testada, no *PRC 525 HF/VHF* (ilustrado na Figura 4.19), uma antena multifilar construída pela *EID*, para *NVIS*, representada na Figura 4.20.



Figura 4.19 Rádio E/R PRC 525, utilizado nos ensaios, localizado em Barcarena



Figura 4.20 Antena multifilar para E/R PRC 525, da EID

4.4 Resultados experimentais

Os testes efectuados ocorreram durante a manhã do dia 24 de Setembro de 2013, entre o período das 11h e as 14h. Tal como já foi referido anteriormente, a ligação efectuou-se entre Barcarena (Oeiras), e Cheleiros (Mafra).

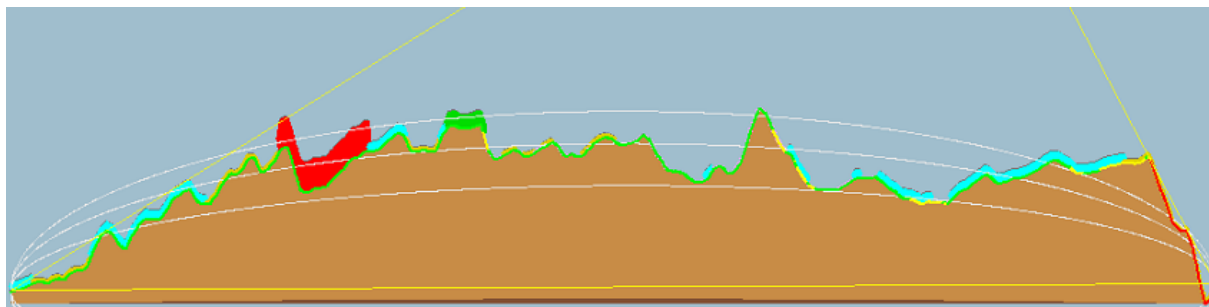


Figura 4.21 Perfil da ligação Barcarena - Cheleiros

Com o fim de estabelecer um padrão de referência, utilizou-se na emissão duas antenas: a antena projectada MR13, e uma das antenas *Harris* fornecidas pela Marinha.

Todas as antenas, nesta ligação, foram alimentadas com 20 W de potência. Ligou-se o rádio *IC-706MKIIG* da *ICOM* às antenas localizadas em Barcarena (a antena construída, *NVIS MR13* e a antena *Harris*, dos fuzileiros). À antena localizada em Cheleiros, ligou-se o *PRC 525 HF/VHF*.

Neste dia, a absorção na camada D, em termos de atenuação, estava 'limpa', apresentando assim valores nulos para a atenuação desta camada, para as várias frequências críticas de reflexão, como se comprova pela seguinte imagem, retirada de <http://nvis-tuga.blogspot.pt/2011/01/absorcao-na-camada-d.html>, acedida em 24 de Setembro 13.

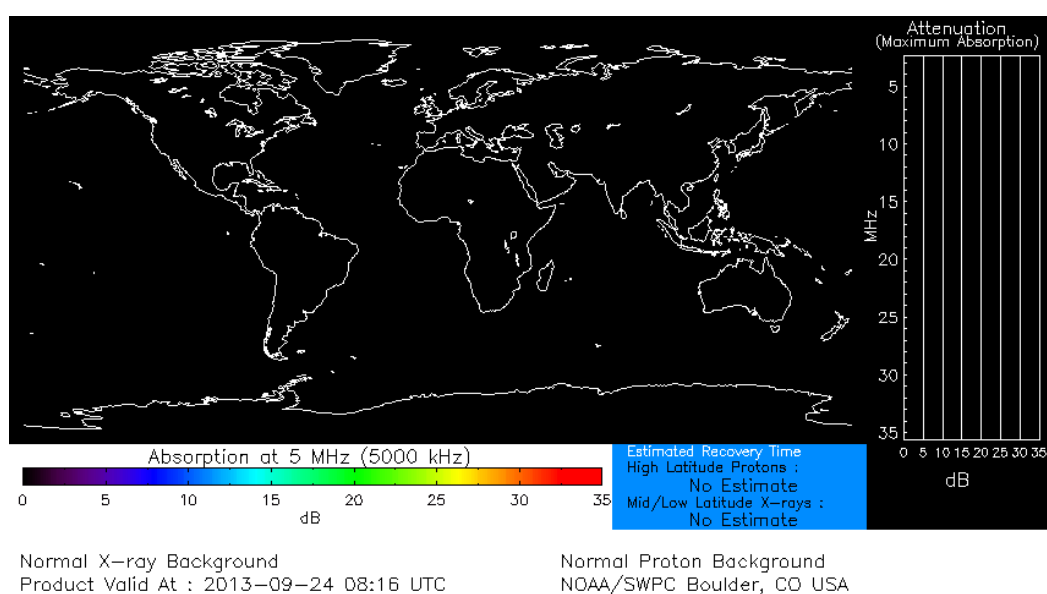


Figura 4.22 Absorção ionosférica da camada D

De acordo com a Figura 4.23, as frequências críticas de reflexão medidas por ionosondas, para a camada F_2 , relativas à latitude de Portugal, situam-se entre os 6 MHz e os 7 MHz.

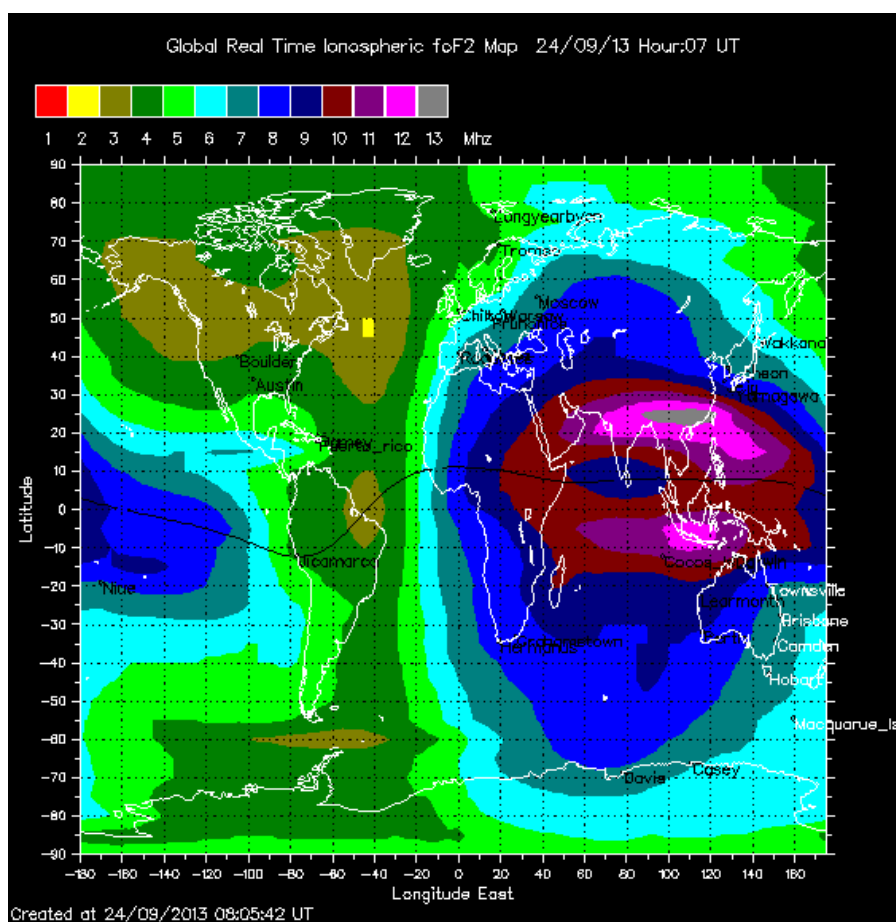


Figura 4.23 Mapa ionosférico para a frequência crítica na camada F_2

Esta ligação, tal como referido anteriormente, é uma ligação da ordem de 20 km de distância, com um ângulo de incidência na ionosfera de cerca de 89° .

Os ensaios efectuados com a antena *NVIS MR13*, foram executados com, e sem a inserção do *balun* de corrente (para equilibrar a antena).

Utilizaram-se as seguintes frequências de teste e obtiveram-se os valores da potência recebida, contemplados na tabela seguinte:

Tabela 4.5 Potências do sinal em função da frequências para a ligação NVIS, Cheleiros-Barcarena

Frequências (MHz)	Potência do sinal recebido (dBm)		
	Antena NVIS MR13 construída		Antena Harris RF
	Com <i>balum</i>	Sem <i>balum</i>	
3,550	-102	-103	<i>N/D</i>
4,150	-102	-103	<i>N/D</i>
5,495	-96	-99	-102
6,290	-80/-91	-91/-99,5	-99,5
7,245	-103	<i>N/D</i>	<i>N/D</i>

As situações em que não se conseguiu obter um valor de medida, estão representadas por *N/D* (não definido).

Como se pode ler na Tabela 4.5, a comunicação NVIS, começa em cerca de 3.550 MHz, e estende-se até cerca de 7 MHz. Na última medida de 7.245 MHz, nota-se a perda da ligação em virtude de se situar acima da frequência crítica de reflexão (foF_2) para estes ângulos de incidência vertical (aproximadamente 89° de elevação). Com a inserção do *balum*, notaram-se melhorias de cerca de 8 dB a 10 dB, no sinal recebido, em virtude da antena estar equilibrada e os lobos serem simétricos. Partindo dos dados referidos na mesma tabela, é possível concluir que houve transmissão por efeito NVIS, tal como o pretendido.

A antena *Harris*, demonstrou possuir um desempenho, abaixo do que era previsto. As causas podem ter várias origens que ainda estão a ser averiguadas, nomeadamente nas ligações dos vários elementos coaxiais que constituem o mastro, puderem estar com maus contactos. Na figura seguinte está representada a antena *Harris* localizada em Barcarena.



Figura 4.24 Antena *Harris* RF 1936, localizada em Barcarena

A Tabela 4.5, prova ainda que a ligação existente é feita unicamente através de propagação por efeito *NV/S* (ausência da onda de solo), pois abaixo do 3.550 MHz e acima de 6.300 MHz, não se consegue ligação, ou esta é muito escassa e insuficiente para ser efectuada uma comunicação. Se houvesse onda de solo, conseguir-se-ia comunicar abaixo de 3.550 MHz, assim como para valores superiores a 6.300 MHz e continuamente em toda a gama de frequências apresentadas na mesma tabelaTabela 4.5.

Ligação Alternativa 1: Barcarena – Santa Cruz

Estabeleceu-se outra ligação entre Barcarena (Oeiras) – Santa Cruz (Torres Vedras). Esta ligação dista cerca de 45 km entre as antenas, e foi efectuada utilizando a frequência de 7.065 MHz. O sinal recebido foi de -80 dBm. A antena localiza-se em Santa Cruz, pertence a um posto de rádio do serviço de amador (radioamador), a operar na faixa de frequência próxima na mesma banda em que se efectuaram os ensaios anteriores. A Figura 4.25 representa o perfil referido.

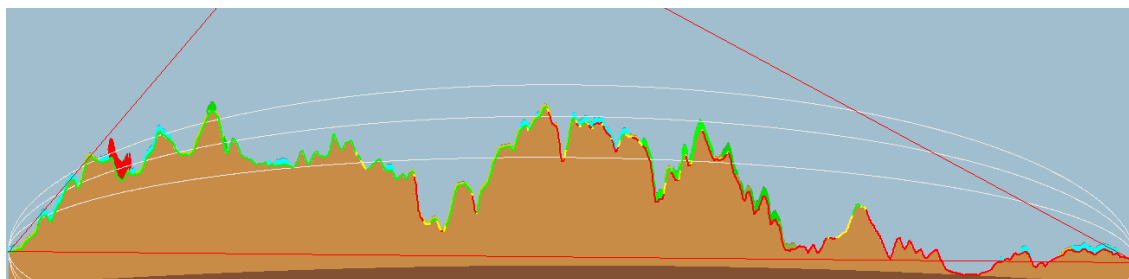


Figura 4.25 Perfil da ligação Barcarena – Santa Cruz

Esta ligação permitiu comprovar que a propagação por *NV/S*, para distâncias superiores a 20km, com ângulos de elevação inferiores a 89°, correspondem a frequências acima da frequência crítica de reflexão de 6.290 MHz.

Tabela 4.6 Características da ligação Barcarena – Santa Cruz

Barcarena (Oeiras)		Santa Cruz (Torres Vedras)	
Latitude	38.731858°	Latitude	39.132191°
Longitude	-9.280915°	Longitude	-9.375114°
Altura da antena (m)	4	Altura da antena (m)	4
Altura em relação ao mar (m)	57	Altura em relação ao mar (m)	39.3
Distância (km)		45.212	
Ângulo de elevação		86°	

Ligação Alternativa 2: Barcarena – Alpiarça

Foi estabelecida uma outra ligação, para uma distância de cerca de 84 km, nomeadamente para a localidade de Alpiarça, na região de Santarém. Esta antena localiza-se em Alpiarça, e pertence a um posto de rádio do serviço de amador (radioamador), a operar na faixa de frequência próxima na mesma banda em que se efectuaram os ensaios anteriores. Utilizou-se a mesma frequência, que para Santa Cruz, de 7.065 MHz em que se recebeu um sinal de -91 dBm. A figura seguinte ilustra o perfil desta ligação.

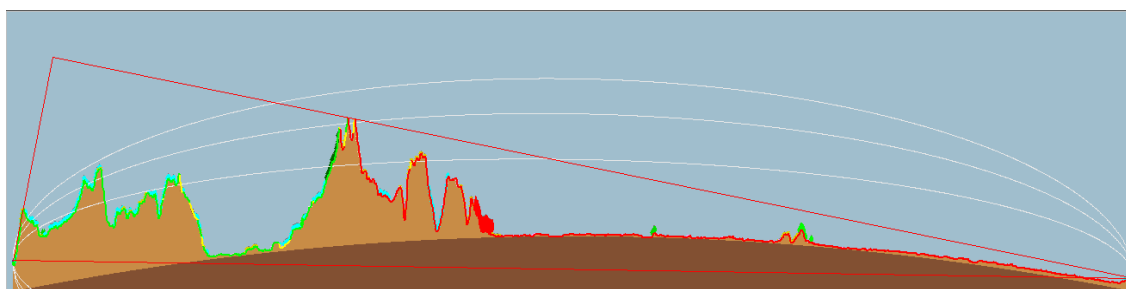


Figura 4.26 Perfil da ligação Barcarena - Alpiarça

Esta ligação é deveras importante e interessante para os ensaios, pois foi possível determinar que a propagação na ionosfera por efeito *NVIS* permitiu nestas condições fazer uma ligação de cerca de 84 km. Comprova-se que é possível garantir a cobertura de ligações entre distâncias de cerca de 20 km até cerca de 120 km, tal como definido.

Tabela 4.7 Características da ligação Barcarena - Alpiarça

Barcarena (Oeiras)		Alpiarça (Santarém)	
Latitude	38.731858°	Latitude	39.258576°
Longitude	-9.280915°	Longitude	-8.582726°
Altura da antena (m)	4	Altura da antena (m)	4
Altura em relação ao mar (m)	57	Altura em relação ao mar (m)	22.5
Distância (km)		84.085	
Ângulo de elevação		83°	

Por último, e como referido no início do subcapítulo, ensaiou-se nesta ligação, a cerca de 84 km, uma antena filar desenvolvida pela *EID*, para o *PRC 525*. Esta antena consiste num condutor multifilar com 15 metros de comprimento, directamente acoplado à *ATU* e na extremidade, um isolamento ligado a um contrapeso metálico que confere tensão ao fio, de modo que esta antena possa ser lançada para cima de um arvoredo a uma dada altura do solo. No ensaio realizado, a antena funcionou nas condições menos favoráveis, junto ao solo.

A antena filar foi testada para as ligações de Barcarena – Santa Cruz, e para Barcarena – Alpiarça. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 4.8 Potências do sinal em função da frequências para as ligações NVIS, Barcarena-Santa Cruz e Alpiarça

Frequência (MHz)	Potência de Sinal (dbm)			
	Santa Cruz		Alpiarça	
	Antena NVIS MR13 sem balum	Antena filar	Antena NVIS MR13 sem balum	Antena filar
7,065	-80	-101	-85	-102



Figura 4.27 Antena filar construída pela EID para o PRC 525

Com esta antena, conseguiram-se estabelecer comunicações NVIS, para as localidades de Santa Cruz e Alpiarça, mas com valores de potência recebida nas localidades referidas, muito inferiores aos obtidos pela ligação com a antena NVIS MR13.

5. Conclusões e perspectivas futuras

Este trabalho, com as suas várias etapas de desenvolvimento teórico, simulação, construção e ensaio da antena, permitiu consolidar e aprofundar os conhecimentos que tinham sido adquiridos previamente nas cadeiras de Propagação e Radiação de Ondas Electromagnéticas (PROE), na Academia Militar e Antenas, no Instituto Superior Técnico. Permitiu ainda adquirir uma sensibilidade em relação aos equipamentos utilizados e aos vários factores que podem afectar o desempenho de uma ligação.

Considero que sou um privilegiado por ter tido a sorte de fazer uma dissertação na área que desde o início do curso me fascinou, rádio e telecomunicações e que será uma parte importante da minha vida futura como oficial de Transmissões. Poder ter como orientadores, pessoas extremamente competentes nesta área, e acima de tudo sempre prontos a ajudar, assim como ter o apoio de uma das pessoas com maior conhecimento e experiência práticos, na área da propagação por efeito *NVIS* em Portugal.

Esta dissertação permitiu-me ainda adquirir conhecimentos na área de propagação via ionoesfera que não é ensinada actualmente no currículo de Telecomunicações, mas que apresenta um renascimento, principalmente para comunicações militares ou de emergência, devido à utilização da propagação *NVIS*.

Foi projectada, simulada e construída uma antena, denominada *NVIS MR13*, que demonstrou corresponder aos requisitos inicialmente estabelecidos para este projecto. Trata-se de uma antena de baixo custo e configuração simples, que permite assegurar comunicações tácticas ou de emergência e de elevado interesse para os actuais TO, como o Afeganistão e o Kosovo.

Foi inicialmente projectada uma antena com uma única frequência de ressonância, tendo posteriormente evoluído para uma antena de sintonia múltipla onde se simularam os diagramas de radiação assim como o S_{11} , a largura de banda, entre outras características.

Através de vários gráficos respeitantes à variação da frequência de plasma com as horas do dia, conclui-se que no Verão, é possível manter uma comunicação por *NVIS*, durante praticamente todo o dia. Em contra partida, no Inverno, o intervalo de tempo em que se consegue ter propagação *NVIS* é muito mais curto, sendo por vezes, em alguns casos, de algumas horas, apenas entre as 09h e as 18h, como se pode verificar na Figura 2.12 e na Figura 2.13.

Relativamente aos ensaios efectuados, foram estudados alguns perfis na zona de Lisboa, Setúbal e Sintra, sendo que o perfil que melhor se enquadrou de acordo com o pretendido, a nível de distância e obstáculos entre a ligação foi o perfil entre Barcarena (Oeiras) e Cheleiros (Mafra).

Os ensaios realizados foram satisfatórios, pois conseguiu-se comprovar com sucesso, do ponto de vista prático e teórico, a forma como funcionam as radiocomunicações por *NVIS*, para as distâncias propostas entre 20 km e 120 km.

A antena *NVIS MR13*, foi projectada para ser ressonante às frequências de 4 MHz e 6 MHz, que estão próximas dos valores extremos onde ocorre reflexão, no período de Verão, na latitude de Portugal. As frequências de ressonância apresentaram um desvio de cerca de 500 kHz em relação aos valores de ressonância calculados. Estas diferenças podem ser devidas a vários factores,

nomeadamente à interacção entre os dipolos, devido à própria configuração da antena e altura ao solo, assim como às características do fio de antena utilizado.

No que diz respeito à curva das frequências de ressonância, para conferir maior largura de banda e melhorar a adaptação, entre as frequências de 3.5 MHz e 5.6 MHz, poder-se-ia ter construído uma malha de adaptação RC. No entanto, esta malha, iria inserir perdas quer para as frequências de ressonância, quer para a toda a banda, diminuindo o ganho da antena.

Na ligação feita com as antenas *Harris*, não foram obtidos os resultados esperados, pois os valores do sinal recebido, em relação à antena *NVIS MR13*, foram muito inferiores. Esta diferença pode resultar do facto de existirem eventuais maus contactos momentâneos nas ligações entre os vários elementos constituintes do mastro coaxial destas antenas, assim como a uma possível oxidação das respectivas ligações.

Mais tarde, foi efectuada uma limpeza e manutenção às antenas *Harris*, e veio-se a constatar que devido ao salitre, a ligação entre os elementos coaxiais estava oxidada, possivelmente um dos motivos a que levou os fracos resultados de eficiência destas antenas.

Em conclusão, pode-se dizer que foi projectada e construída uma antena que possui um bom desempenho, superior ao das antenas *Harris*, gentilmente cedidas para os ensaios, pela Marinha. A antena *MR13*, trata-se de uma antena de baixo custo, de fácil montagem e que será com certeza muito útil em comunicações tácticas e de emergência, como as que se verificam por vezes nos TO, em que o Exército Português está envolvido.

Perspectivas futuras

Esta dissertação oferece várias perspectivas interessantes de desenvolvimentos futuros em que se salientam os seguintes:

- Construir uma antena com mais de dois elementos radiantes, com diferentes frequências de ressonância, o que permitiria, por exemplo, aumentar a largura de banda da antena construída, tendo em conta que as frequências críticas de reflexão que ocorrem na latitude em que nos encontramos, estão compreendidas entre 3 MHz e 7 MHz, mais especificamente no período diurno entre 4 MHz e 7 MHz, e no período nocturno entre 3 MHz a 4 MHz.
- Utilizar outras configurações da antena, por exemplo, uma ou mais espiras, com frequências de ressonância diferenciadas.

Bibliografia

- [1] J. F. Corum, A Physical Interpretation of the Colorado Springs Data, 1986.
- [2] J. S. Belrose, "Fessenden and Marconi: Their Differing Technologies and Transatlantic Experiments During the First Decade of this Century," 1995.
- [3] "The Ionosphere," [Online]. Available: <http://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/ionosph.htm>. [Acedido em 19 Agosto 2013].
- [4] B. A. Austin, "Evolution of near vertical incidence skywave communications and the Battle of Arnhem," vol. 149, n.º Measurement and Technology, 2002.
- [5] M. Greenman, "An Introduction to HF propagation," [Online]. Available: <http://www.qsl.net/zl1bpu/IONO/iono101.htm>. [Acedido em 19 Agosto 2013].
- [6] E. M. Gonçalves, Interviewee, [Entrevista]. 12 Abril 2013.
- [7] K. Davies, Ionospheric Radio, Peter Peregrinus Ltd, 1990.
- [8] A. C. Mateus, Soluções W.K.B. para o cálculo da intensidade de campo na baixa ionosfera, 2007.
- [9] V. G. Pillat, Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional Lion e comparação com parâmetros ionosféricos observados, São José dos Campos, SP, 2006.
- [10] K. Davies, Ionospheric Radio Propagation, 1965.
- [11] J. Fignier, Aspectos de Propagação na Atmosfera.
- [12] T. C. & R. B. R. Geoger Jacobs, The NEW Shortwave Propagation Handbook.
- [13] A. C. M. Steffen, "Radiometria óptica espectral," em *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, São José dos Campos, 1996.
- [14] D. Bilitza, International Reference Ionosphere, Radio Science, 2001.
- [15] J. K. Hargreaves, The Solar-Terrestrial Environment, Cambridge University Press, 1995.
- [16] J. J. Carr, Practical Antenna Handbook, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [17] M. J. A. Faro, Introdução ao Estudo das Ondas Electromagnéticas, AEIST, 1961-62.

- [18] A. Government, "Introduction to HF Radio Propagation," IPS Radio and Space Services.
- [19] ITU-Radiocommunication, *Definitions of Maximum and Minimum Transmission Frequencies*.
- [20] N. P. School, "Atmospheric Effects on Electromagnetic Systems," [Online]. Available: http://www.weather.nps.navy.mil/~psguest/EMEO_online/. [Acedido em 10 Setembro 2013].
- [21] C. A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, second edition, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [22] M. J. Martins, "Radiação - Folhas de Propagação e Radiação de Ondas Electromagnéticas," Academia Militar, 2002.
- [23] O. d. l'Ebre, "Observatori de l'Ebre," 2012. [Online]. Available: <http://www.obsebre.es/>. [Acedido em 15 Setembro 2013].

ANEXOS

ANEXO 1

Cálculo dos produtos externos para a obtenção dos campos dos dipolos

Desenvolvendo o produto externo, para um dipolo orientado segundo o eixo dos yy:

$$\hat{e}_y \times \hat{e}_r = \begin{vmatrix} \hat{e}_r & \hat{e}_\theta & \hat{e}_\varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = (-\cos \varphi) \hat{e}_\theta - (\cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\varphi = \quad (1.1)$$

$$= [(-\cos \varphi) \hat{e}_\theta - (\cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\varphi] \times \hat{e}_r = \begin{vmatrix} \hat{e}_r & \hat{e}_\theta & \hat{e}_\varphi \\ 0 & -\cos \varphi & -\cos \theta \sin \varphi \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \quad (1.2)$$

$$= \cos \varphi \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta \quad (1.3)$$

De seguida, iremos fazer os cálculos, para um dipolo colocado segundo xx:

$$\hat{e}_x \times \hat{e}_r = \begin{vmatrix} \hat{e}_r & \hat{e}_\theta & \hat{e}_\varphi \\ \sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \sin \varphi \hat{e}_\theta - (\cos \theta \cos \varphi) \hat{e}_\varphi = \quad (1.4)$$

$$= [\sin \varphi \hat{e}_\theta - (\cos \theta \cos \varphi) \hat{e}_\varphi] \times \hat{e}_r = \begin{vmatrix} \hat{e}_r & \hat{e}_\theta & \hat{e}_\varphi \\ 0 & \sin \varphi & -\cos \theta \cos \varphi \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \quad (1.5)$$

$$= -\sin \varphi \hat{e}_\varphi + \cos \theta \cos \varphi \hat{e}_\theta \quad (1.6)$$

Fazendo agora a soma dos dois campos:

$$E_{\text{total}} = E_x + E_y = -\sin \varphi \hat{e}_\varphi + \cos \theta \cos \varphi \hat{e}_\theta + \cos \varphi \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta \quad (1.7)$$

O campo total resulta na seguinte:

$$E_{\text{total}} = \frac{Ni}{2\lambda r} Z_0 [(-\sin \varphi + \cos \varphi) \hat{e}_\varphi + (\cos \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi) \hat{e}_\theta] \quad (1.8)$$

ANEXO 2

Material utilizado para a construção da antena

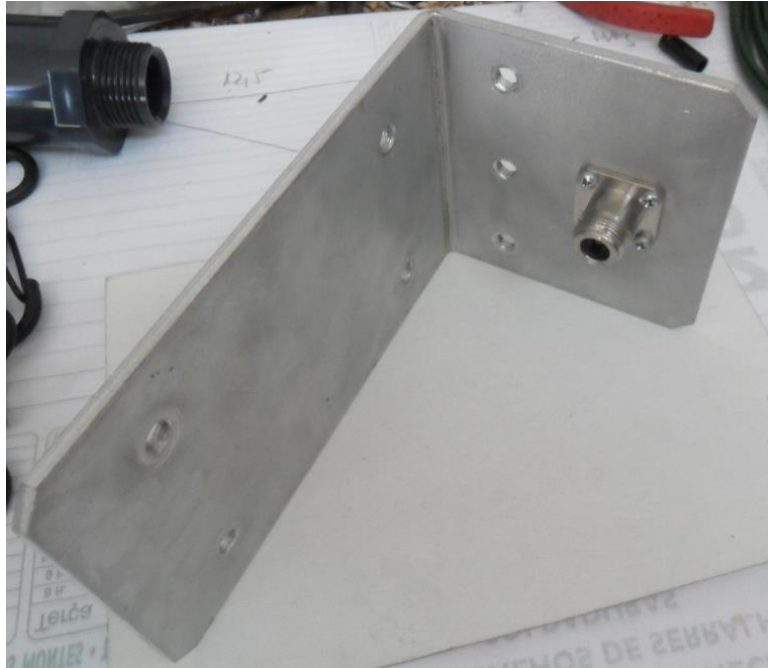


Troço de fio de antena com 16 metros



Ficha de alvéolo fêmea, ficha monopolar (banana) e mosquetão

ANEXO 2 (continuação)



Base de metal do suporte da antena, com com ficha PL259



Tampas de PVC

Datasheet do fio de antena Ormiston Wire limited

Ormiston Wire Limited

Technical & Product Information

BRAID

We make all kinds of braid from a small 100 metre prototype length to continuous runs in a wide variety of metals, sizes and constructions. We manufacture to the customer's requirements so we require as much information as available, and if possible a sample, before quoting.



Braid Construction

For example 24/10/0.2mm means 24 bobbins with 10 wires per bobbin, wire size 0.2mm. Cross sectional area of wire (see back page) 0.2mm=0.031420x10x24=7.54 CSA sq mm.

Stock Braids

Stockists of a range of copper braids from 10 amp to 250 amp carrying capacity Amps rating are equilibrium values in free air at 30 degrees above ambient temperature.

PLAIN COPPER BRAID

Part number	Amps	Construction	Approx dimensions	OD	CSA	WT KG/100MTS
211-0010	10	16/4,0/10	2.0 x 0.8mm	1.25	0.20	0.32
211-0030	20	16/5,0/15	3.0 x 1.0mm	2.50	1.41	1.32
211-0030	30	34/7,0/15	7.0 x 1.25mm	4.00	2.97	2.96
211-0040	40	26/12,0/15	9.0 x 1.25mm	5.20	5.29	4.94
211-0050	50	24/10,0/20	10.0 x 1.25mm	6.20	7.24	7.71
211-0100	100	32/16,0/20	20.0 x 1.5mm	9.00	16.20	16.44
211-0150	150	32/27,0/20	25.0 x 2.0mm	13.00	27.14	27.24
211-0200	200	2/32,21,0/20	25.0 x 3.0mm	15.00	42.20	43.15
211-0250	250	2/32,29,0/20	25.0 x 5.0mm	17.00	56.00	59.32

CLEAR PVC COVERED TINNED COPPER BRAID

212-2815		24/9,0/30	21 x 4.0mm	FLAT	15	15.75
212-2839		2/32,9,0/30	20 x 6.0mm	FLAT	39	41.00
212-2870		32/11,0/30	34 x 7.5mm	FLAT	70	74.00

TINNED COPPER BRAID

213-0030	20	16/5,0/15	3.0 x 1.0mm	2.50	1.41	1.32
213-0050	50	24/10,0/20	10.0 x 1.5mm	6.20	7.94	7.71
213-0100	100	32/16,0/20	20.0 x 1.5mm	9.00	16.20	16.44
213-0150	150	32/27,0/20	25.0 x 2.0mm	13.00	27.14	27.24

ALUMINIUM BRAID

310-0025	25	16/6,0/30	9.2mm WIDE		6.78	2.00
310-0050	50	16/14,0/30	19mm WIDE		15.83	4.20
310-0100	100	32/14,0/30	25mm WIDE		31.66	9.40

PLAIN COPPER BRAIDED CORD

214-0196		16/7,0/1		3.4	5	4.8
		7/75,0/1				

ANTENNA BRAID

999-2011		16/4,0/10	PVC coated in forest green or olive drab	2.9		
		5 ENDS KEVLAR				

Plastic Coating: We have our own in-house extrusion line and can cover to order.

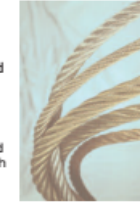
STRANDS (Concentric and bunches)

We manufacture to order Wire Strands in many metals, sizes and constructions. These are used in engineering where non-magnetic material is required, the electrical and electronic trade for use as antenna and conductors.

In the lighting industry where low voltage lighting cables are used, these have a Kevlar core for strength and lightness. We can also plastic coat to order. The enamelled strands and braids are insulated and mostly used in transformer manufacture. Please contact us with all your requirements for specialist cables. We also keep ex-stock stainless steel and galvanised wire ropes.

Strand Construction

For example, 7/7/0.3mm means 7 strands with 7 wires in each strand, wire size 0.3mm. Cross sectional area of wire (see back page) 0.3mm=0.07069 x 7 x 7 = 3.46 CSA sq mm



MICROCABLES AND BRASS FERRULES

Fine stainless steel cables, both plain and nylon, covered in a variety of sizes and constructions. For use as control cables in electronic, medical, scientific, optical and photographic equipment, drawing boards, in fact any use where a low stretch, strong, small diameter flexible cable is required.



BARE

Dia. mm	Cords	Part No	Strength	Ferrule
0.23	1 x 3	706-0045	4.5 kg	10 lbs
0.26	1 x 3	706-0068	6.8 kg	15 lbs
0.32	1 x 3	706-0091	9.0 kg	20 lbs
0.39	1 x 3	706-0136	13.6 kg	30 lbs
0.46	1 x 7	706-0227	22.8 kg	50 lbs
0.51	1 x 7	706-0340	34.0 kg	75 lbs
0.60	1 x 7	706-0454	45.3 kg	100 lbs
0.75	1 x 7	706-0680	68.0 kg	150 lbs
0.87	1 x 7	706-0907	90.6 kg	200 lbs
1.05	1 x 7	706-1134	113.4 kg	250 lbs
1.20	7 x 7	706-0794	79.3 kg	175 lbs
1.20	7 x 7	706-1134	113.4 kg	250 lbs
1.20	7 x 7	706-1361	136.0 kg	300 lbs

NYLON COVERED

Dia. mm	Cords	Part No	Strength	Ferrule
0.26	1 x 3	704-0045	4.5 kg	10 lbs
0.26	1 x 3	704-0068	6.8 kg	15 lbs
0.26	1 x 3	704-0091	9.0 kg	20 lbs
0.26	1 x 3	704-0136	13.6 kg	30 lbs
0.26	1 x 7	704-0227	22.8 kg	50 lbs
0.26	1 x 7	704-0340	34.0 kg	75 lbs
0.26	1 x 7	704-0454	45.3 kg	100 lbs
0.26	1 x 7	704-0680	68.0 kg	150 lbs
0.26	1 x 7	704-0907	90.6 kg	200 lbs
0.26	1 x 7	704-1134	113.4 kg	250 lbs
0.26	7 x 7	706-0794	79.3 kg	175 lbs
0.26	7 x 7	706-1134	113.4 kg	250 lbs
0.26	7 x 7	706-1361	136.0 kg	300 lbs

BRASS FERRULES

	Length	OD	ID
1	903-0001	7 mm	1.72
2	903-0002	10 mm	2.40
3	903-0003	12 mm	3.01

	Length	OD	ID
4	903-0004	14 mm	3.46
5	903-0005	16 mm	4.27
6	903-0006	18 mm	4.85

For cables over 100 lbs strength, two ferrules are recommended.

ANEXO 3

Equipamento utilizado nos ensaios



Antena NVIS MR13



Antena Harris modelo *RF-1936/38*

ANEXO 3 (continuação)

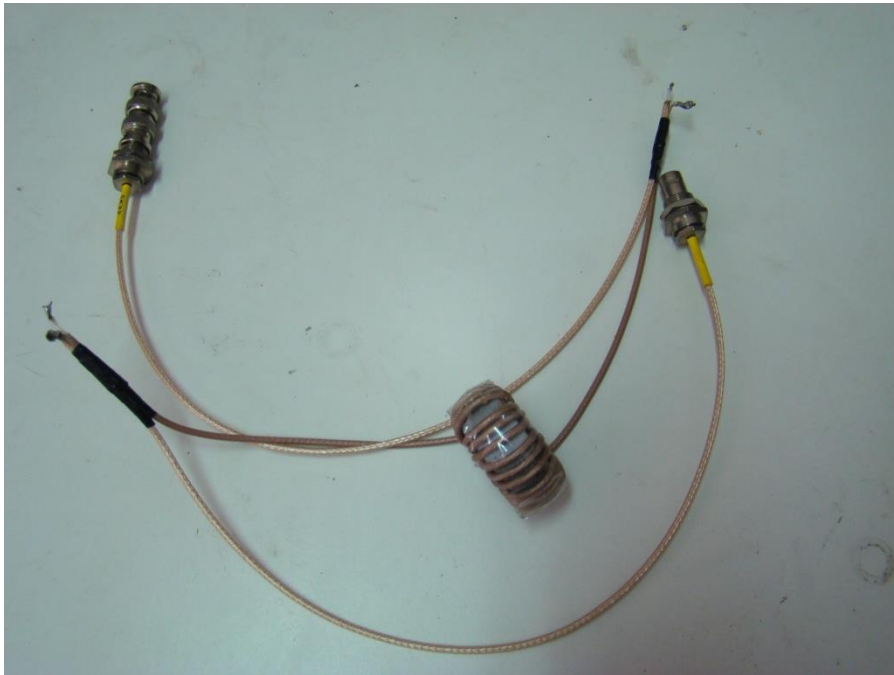


Emissor-receptor IC-706MKIIG



PRC 525 HF/VHF

ANEXO 3 (continuação)



Balum construído



Antena filar NVIS para PRC 525

ANEXO 3 (continuação)

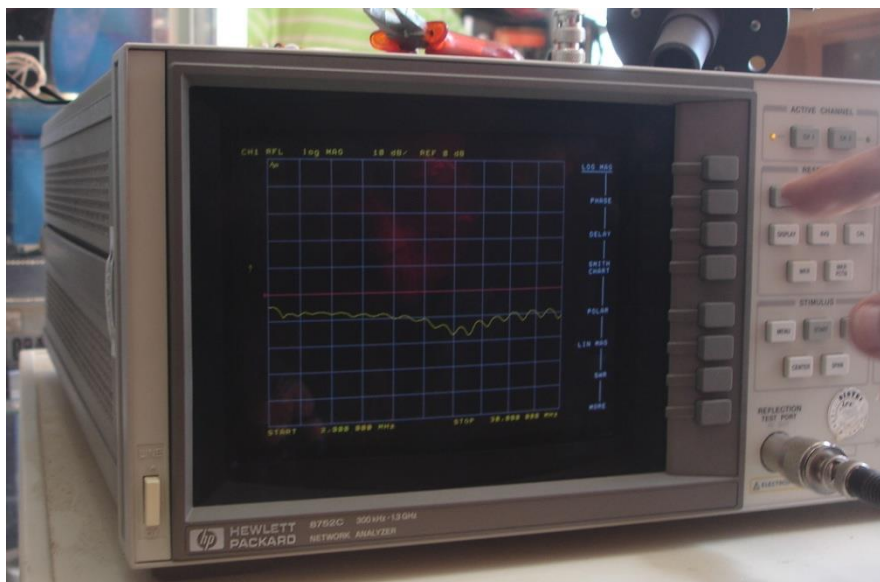


Comutador coaxial de 4 entradas

ANEXO 3 (continuação)



Radio Communication Test Set, CMTA54, Rohde & Schwarz



Analísador de redes HP 8752C Network Analyzer

Datasheet antenas Harris

HARRIS
assuredcommunications™



**RF-1936
(AS-2259/GR)/
RF-1938**
**PORTABLE CROSSED
DIPOLE ANTENNA**

for NVIS (near vertical
incidence skywave)
communications


The RF-1936/38 Series of antennas are man-portable and rapid-deployable for NVIS communications.

The NVIS communication mode is for paths from 10 to 400 km. This communication mode is particularly useful in mountainous, heavily wooded terrain, or dry sandy soil where groundwave is limited. The RF-1936 is used for general purpose NVIS communication links out to 400 km; while the RF-1938 is designed for the hard to close 10 to 200 km links.

These lightweight antenna systems are easily carried and installed by two people in five minutes (RF-1936) or 15 minutes (RF-1938). The sectional mast is a low loss coaxial feed line to feed unequal length crossed dipole radiating elements. The radiating elements are attached to guy ropes that provide mast support. The entire antenna stows within a small canvas bag. The RF-1938 has a second set of coaxial masts and guy lines which stow within a second canvas bag.

Specifications for the RF-1936/RF-1938



Typical Installation of an RF-1936

Electrical

- **Frequency Range**
2 to 30 MHz with antenna coupler
- **RF Power Capacity**
400 Watts
- **Input Impedance**
Compatible with RF-5800H internal coupler and RF-382 Antenna Couplers
- **Radiation Pattern**
Azimuth: omnidirectional
Elevation: see radiation patterns below
- **Polarization**
Horizontal for the RF-1936 or a RF-1938
Vertical if used with the monopole conversion kit option
- **VSWR**
In accordance with RF-5800H internal coupler and RF-382 Antenna Couplers
- **Gain**
See radiation patterns below

Environmental

- **Temperature**
Operating: -40° to +55° C
(-40° to +131° F)
Storage: -60° to +70° C
(-76° to +158° F)
- **Wind**
RF-1936: 60 mph (96 kph) with no ice

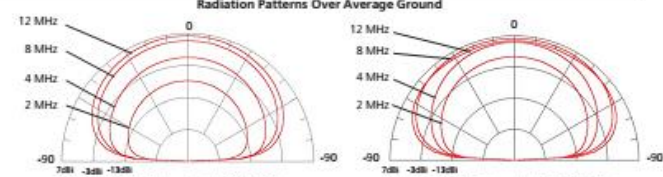
Mechanical

- **RF Connector**
Side feed with wing nut
- **Dimensions**
Stowed:
RF-1936: 1 bag 26" long x 7" dia.
RF-1938: 2 bags 26" long x 7" dia.
Deployed: RF-1936 - 61 by 61 ft.
- **Finish**
RF-1936P-10 CARC 383 Green
RF-1936P-30 Semi Gloss Green
RF-1936V-10 CARC 383 Green
RF-1936V-30 Semi Gloss Green
RF-1938AT-10 CARC 383 Green
RF-1938AT-30 Semi Gloss Green
- **Weight**
RF-1936: 15 lb.
RF-1938: 27 lb.
- **Height**
RF-1936: 15 ft. (4.6 m)
RF-1938: 27.9 ft. (8.6 m)
- **Installation Time**
RF-1936: 5 min. with 2 people
RF-1938: 15 min. with 2 people

Options

- **Monopole Conversion Kit:**
RF-1938-AT003 (convert RF-1936/38 to top loaded monopole)
- **Vehicular Antenna Adapter:** RF-1936-01 (included with the RF-1936V)
- **Mounting Plate for flat surface:** RF-1936-02 (included with the RF-1936P and RF-1938AT)

Radiation Patterns Over Average Ground



2, 4, 8, 12 MHz Patterns for the RF-1936 Antenna

2, 4, 8, 12 MHz Patterns for the RF-1938 Antenna

Specifications are subject to change without notice.

HARRIS
assuredcommunications™

RF Communications Division | 1680 University Avenue | Rochester, NY USA 14610
www.harris.com 1-585-244-5830

Copyright © 2005 Harris Corporation 8/05 DS-274A

Datasheet do emissor-receptor IC-706MKIIG



HF/VHF/UHF ALL MODE TRANSCEIVER

IC-706MKIIG



160m-70cm
HF+6m+2m+70cm

Meets MIL-STD 810

The amazing evolution of the '706' series...

ICOM Inc.

HF/VHF/UHF ALL MODE TRANSCEIVER

IC-706MKIIG

SPECIFICATIONS

GENERAL

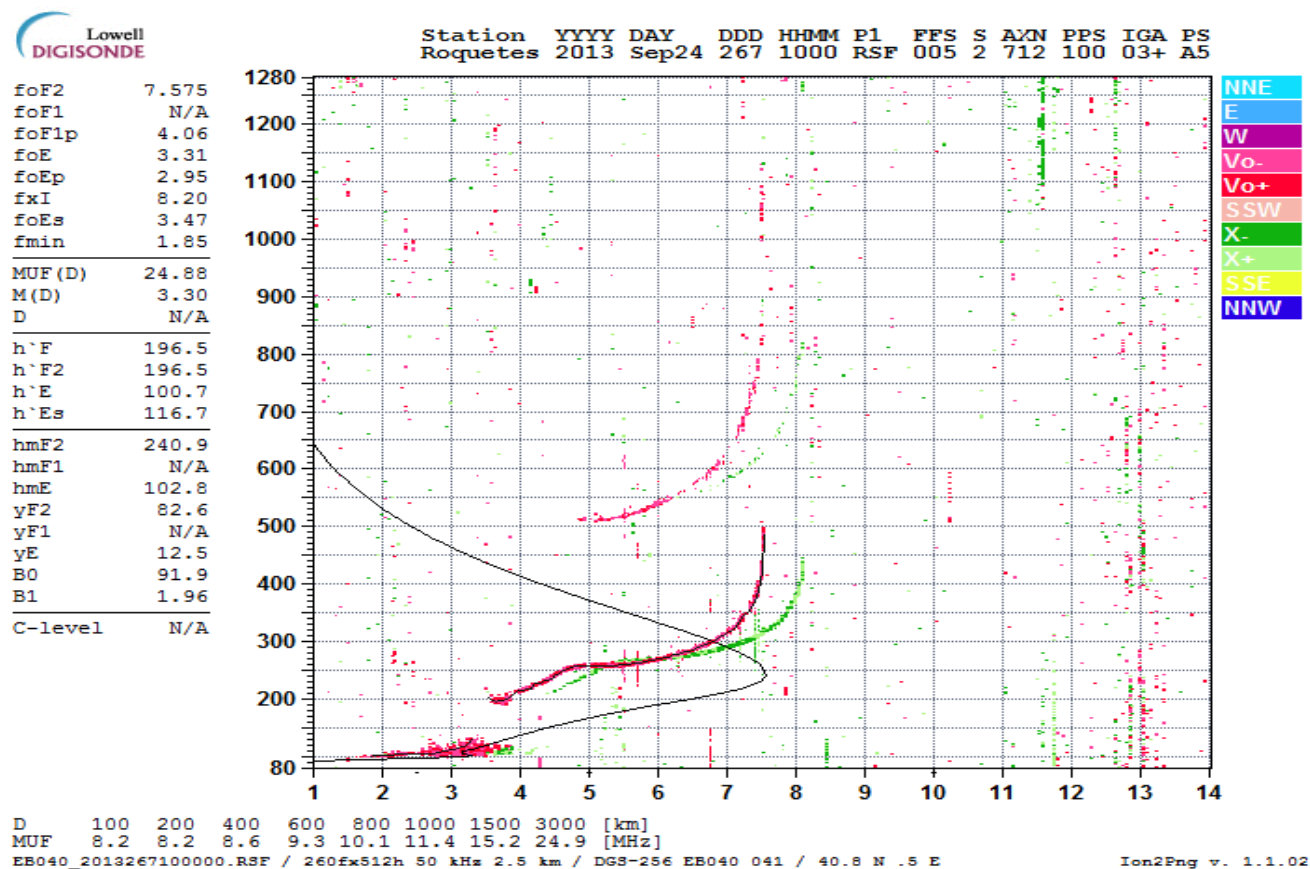
- Frequency coverage
 - Receiver: 0.180-180 MHz* 400-475.0 MHz*
 - Transmit: 1.8-3.0 MHz* 3.5-3.8 MHz*
 - 14.0-14.350 MHz 10.1-10.130 MHz
 - 21.0-21.450 MHz 28.48-28.580 MHz
 - 28.0-29.700 MHz 30.0-34.000 MHz
 - 144.0-146.000 MHz 430.0-430.000 MHz*
- Mode
 - USB, LSB, CW, RTTY (FSK), AM, FM, WPM
- No. of memory ch.
 - 127 per segment, 2 and extended
- Antenna connector
 - SO-239 (2 per HF band, 1 per 144/430 MHz band)
- Power supply requirement
 - 13.8V ±10% (negative ground)
- Frequency stability
 - Less than ±7 ppm from 1 min. to 30 min. after power up. After that rate of drift is less than ±1 ppm/hr. at 25°C (±77°F). Temperature drift: 0.1 ppm/°C to 150°C (±32°F to 302°F) less than ±5 ppm.
- Current drain
 - Transmit: 20 A
 - Receive: 1.8 A
 - Standby: 2.0 A
- Usable temp. range
 - 10°C to 60°C (14°F to 140°F)
- Dimensions
 - 160mm × 100mm × 290mm (mm)
- Weight
 - 2.0 kg (4.4 lb) net
- AC V connector
 - 2-conductor 3.5 (5 mm) (1/4")
- ACZ connector
 - 1 pin

TRANSMITTER

- Output power
 - SP5K/5W/10W/15W/20W/30W/40W/50W/60W/70W/80W/90W/100W/120W/140W/160W/180W/200W/220W/240W/260W/280W/300W/320W/340W/360W/380W/400W/420W/440W/460W/480W/500W/520W/540W/560W/580W/600W/620W/640W/660W/680W/700W/720W/740W/760W/780W/800W/820W/840W/860W/880W/900W/920W/940W/960W/980W/1000W/1020W/1040W/1060W/1080W/1100W/1120W/1140W/1160W/1180W/1200W/1220W/1240W/1260W/1280W/1300W/1320W/1340W/1360W/1380W/1400W/1420W/1440W/1460W/1480W/1500W/1520W/1540W/1560W/1580W/1600W/1620W/1640W/1660W/1680W/1700W/1720W/1740W/1760W/1780W/1800W/1820W/1840W/1860W/1880W/1900W/1920W/1940W/1960W/1980W/2000W/2020W/2040W/2060W/2080W/2100W/2120W/2140W/2160W/2180W/2200W/2220W/2240W/2260W/2280W/2300W/2320W/2340W/2360W/2380W/2400W/2420W/2440W/2460W/2480W/2500W/2520W/2540W/2560W/2580W/2600W/2620W/2640W/2660W/2680W/2700W/2720W/2740W/2760W/2780W/2800W/2820W/2840W/2860W/2880W/2900W/2920W/2940W/2960W/2980W/3000W/3020W/3040W/3060W/3080W/3100W/3120W/3140W/3160W/3180W/3200W/3220W/3240W/3260W/3280W/3300W/3320W/3340W/3360W/3380W/3400W/3420W/3440W/3460W/3480W/3500W/3520W/3540W/3560W/3580W/3600W/3620W/3640W/3660W/3680W/3700W/3720W/3740W/3760W/3780W/3800W/3820W/3840W/3860W/3880W/3900W/3920W/3940W/3960W/3980W/4000W/4020W/4040W/4060W/4080W/4100W/4120W/4140W/4160W/4180W/4200W/4220W/4240W/4260W/4280W/4300W/4320W/4340W/4360W/4380W/4400W/4420W/4440W/4460W/4480W/4500W/4520W/4540W/4560W/4580W/4600W/4620W/4640W/4660W/4680W/4700W/4720W/4740W/4760W/4780W/4800W/4820W/4840W/4860W/4880W/4900W/4920W/4940W/4960W/4980W/5000W/5020W/5040W/5060W/5080W/5100W/5120W/5140W/5160W/5180W/5200W/5220W/5240W/5260W/5280W/5300W/5320W/5340W/5360W/5380W/5400W/5420W/5440W/5460W/5480W/5500W/5520W/5540W/5560W/5580W/5600W/5620W/5640W/5660W/5680W/5700W/5720W/5740W/5760W/5780W/5800W/5820W/5840W/5860W/5880W/5900W/5920W/5940W/5960W/5980W/6000W/6020W/6040W/6060W/6080W/6100W/6120W/6140W/6160W/6180W/6200W/6220W/6240W/6260W/6280W/6300W/6320W/6340W/6360W/6380W/6400W/6420W/6440W/6460W/6480W/6500W/6520W/6540W/6560W/6580W/6600W/6620W/6640W/6660W/6680W/6700W/6720W/6740W/6760W/6780W/6800W/6820W/6840W/6860W/6880W/6900W/6920W/6940W/6960W/6980W/7000W/7020W/7040W/7060W/7080W/7100W/7120W/7140W/7160W/7180W/7200W/7220W/7240W/7260W/7280W/7300W/7320W/7340W/7360W/7380W/7400W/7420W/7440W/7460W/7480W/7500W/7520W/7540W/7560W/7580W/7600W/7620W/7640W/7660W/7680W/7700W/7720W/7740W/7760W/7780W/7800W/7820W/7840W/7860W/7880W/7900W/7920W/7940W/7960W/7980W/8000W/8020W/8040W/8060W/8080W/8100W/8120W/8140W/8160W/8180W/8200W/8220W/8240W/8260W/8280W/8300W/8320W/8340W/8360W/8380W/8400W/8420W/8440W/8460W/8480W/8500W/8520W/8540W/8560W/8580W/8600W/8620W/8640W/8660W/8680W/8700W/8720W/8740W/8760W/8780W/8800W/8820W/8840W/8860W/8880W/8900W/8920W/8940W/8960W/8980W/9000W/9020W/9040W/9060W/9080W/9100W/9120W/9140W/9160W/9180W/9200W/9220W/9240W/9260W/9280W/9300W/9320W/9340W/9360W/9380W/9400W/9420W/9440W/9460W/9480W/9500W/9520W/9540W/9560W/9580W/9600W/9620W/9640W/9660W/9680W/9700W/9720W/9740W/9760W/9780W/9800W/9820W/9840W/9860W/9880W/9900W/9920W/9940W/9960W/9980W/10000W/10020W/10040W/10060W/10080W/10100W/10120W/10140W/10160W/10180W/10200W/10220W/10240W/10260W/10280W/10300W/10320W/10340W/10360W/10380W/10400W/10420W/10440W/10460W/10480W/10500W/10520W/10540W/10560W/10580W/10600W/10620W/10640W/10660W/10680W/10700W/10720W/10740W/10760W/10780W/10800W/10820W/10840W/10860W/10880W/10900W/10920W/10940W/10960W/10980W/11000W/11020W/11040W/11060W/11080W/11100W/11120W/11140W/11160W/11180W/11200W/11220W/11240W/11260W/11280W/11300W/11320W/11340W/11360W/11380W/11400W/11420W/11440W/11460W/11480W/11500W/11520W/11540W/11560W/11580W/11600W/11620W/11640W/11660W/11680W/11700W/11720W/11740W/11760W/11780W/11800W/11820W/11840W/11860W/11880W/11900W/11920W/11940W/11960W/11980W/12000W/12020W/12040W/12060W/12080W/12100W/12120W/12140W/12160W/12180W/12200W/12220W/12240W/12260W/12280W/12300W/12320W/12340W/12360W/12380W/12400W/12420W/12440W/12460W/12480W/12500W/12520W/12540W/12560W/12580W/12600W/12620W/12640W/12660W/12680W/12700W/12720W/12740W/12760W/12780W/12800W/12820W/12840W/12860W/12880W/12900W/12920W/12940W/12960W/12980W/13000W/13020W/13040W/13060W/13080W/13100W/13120W/13140W/13160W/13180W/13200W/13220W/13240W/13260W/13280W/13300W/13320W/13340W/13360W/13380W/13400W/13420W/13440W/13460W/13480W/13500W/13520W/13540W/13560W/13580W/13600W/13620W/13640W/13660W/13680W/13700W/13720W/13740W/13760W/13780W/13800W/13820W/13840W/13860W/13880W/13900W/13920W/13940W/13960W/13980W/14000W/14020W/14040W/14060W/14080W/14100W/14120W/14140W/14160W/14180W/14200W/14220W/14240W/14260W/14280W/14300W/14320W/14340W/14360W/14380W/14400W/14420W/14440W/14460W/14480W/14500W/14520W/14540W/14560W/14580W/14600W/14620W/14640W/14660W/14680W/14700W/14720W/14740W/14760W/14780W/14800W/14820W/14840W/14860W/14880W/14900W/14920W/14940W/14960W/14980W/15000W/15020W/15040W/15060W/15080W/15100W/15120W/15140W/15160W/15180W/15200W/15220W/15240W/15260W/15280W/15300W/15320W/15340W/15360W/15380W/15400W/15420W/15440W/15460W/15480W/15500W/15520W/15540W/15560W/15580W/15600W/15620W/15640W/15660W/15680W/15700W/15720W/15740W/15760W/15780W/15800W/15820W/15840W/15860W/15880W/15900W/15920W/15940W/15960W/15980W/16000W/16020W/16040W/16060W/16080W/16100W/16120W/16140W/16160W/16180W/16200W/16220W/16240W/16260W/16280W/16300W/16320W/16340W/16360W/16380W/16400W/16420W/16440W/16460W/16480W/16500W/16520W/16540W/16560W/16580W/16600W/16620W/16640W/16660W/16680W/16700W/16720W/16740W/16760W/16780W/16800W/16820W/16840W/16860W/16880W/16900W/16920W/16940W/16960W/16980W/17000W/17020W/17040W/17060W/17080W/17100W/17120W/17140W/17160W/17180W/17200W/17220W/17240W/17260W/17280W/17300W/17320W/17340W/17360W/17380W/17400W/17420W/17440W/17460W/17480W/17500W/17520W/17540W/17560W/17580W/17600W/17620W/17640W/17660W/17680W/17700W/17720W/17740W/17760W/17780W/17800W/17820W/17840W/17860W/17880W/17900W/17920W/17940W/17960W/17980W/18000W/18020W/18040W/18060W/18080W/18100W/18120W/18140W/18160W/18180W/18200W/18220W/18240W/18260W/18280W/18300W/18320W/18340W/18360W/18380W/18400W/18420W/18440W/18460W/18480W/18500W/18520W/18540W/18560W/18580W/18600W/18620W/18640W/18660W/18680W/18700W/18720W/18740W/18760W/18780W/18800W/18820W/18840W/18860W/18880W/18900W/18920W/18940W/18960W/18980W/19000W/19020W/19040W/19060W/19080W/19100W/19120W/19140W/19160W/19180W/19200W/19220W/19240W/19260W/19280W/19300W/19320W/19340W/19360W/19380W/19400W/19420W/19440W/19460W/19480W/19500W/19520W/19540W/19560W/19580W/19600W/19620W/19640W/19660W/19680W/19700W/19720W/19740W/19760W/19780W/19800W/19820W/19840W/19860W/19880W/19900W/19920W/19940W/19960W/19980W/20000W/20020W/20040W/20060W/20080W/20100W/20120W/20140W/20160W/20180W/20200W/20220W/20240W/20260W/20280W/20300W/20320W/20340W/20360W/20380W/20400W/20420W/20440W/20460W/20480W/20500W/20520W/20540W/20560W/20580W/20600W/20620W/20640W/20660W/20680W/20700W/20720W/20740W/20760W/20780W/20800W/20820W/20840W/20860W/20880W/20900W/20920W/20940W/20960W/20980W/21000W/21020W/21040W/21060W/21080W/21100W/21120W/21140W/21160W/21180W/21200W/21220W/21240W/21260W/21280W/21300W/21320W/21340W/21360W/21380W/21400W/21420W/21440W/21460W/21480W/21500W/21520W/21540W/21560W/21580W/21600W/21620W/21640W/21660W/21680W/21700W/21720W/21740W/21760W/21780W/21800W/21820W/21840W/21860W/21880W/21900W/21920W/21940W/21960W/21980W/22000W/22020W/22040W/22060W/22080W/22100W/22120W/22140W/22160W/22180W/22200W/22220W/22240W/22260W/22280W/22300W/22320W/22340W/22360W/22380W/22400W/22420W/22440W/22460W/22480W/22500W/22520W/22540W/22560W/22580W/22600W/22620W/22640W/22660W/22680W/22700W/22720W/22740W/22760W/22780W/22800W/22820W/22840W/22860W/22880W/22900W/22920W/22940W/22960W/22980W/23000W/23020W/23040W/23060W/23080W/23100W/23120W/23140W/23160W/23180W/23200W/23220W/23240W/23260W/23280W/23300W/23320W/23340W/23360W/23380W/23400W/23420W/23440W/23460W/23480W/23500W/23520W/23540W/23560W/23580W/23600W/23620W/23640W/23660W/23680W/23700W/23720W/23740W/23760W/23780W/23800W/23820W/23840W/23860W/23880W/23900W/23920W/23940W/23960W/23980W/24000W/24020W/24040W/24060W/24080W/24100W/24120W/24140W/24160W/24180W/24200W/24220W/24240W/24260W/24280W/24300W/24320W/24340W/24360W/24380W/24400W/24420W/24440W/24460W/24480W/24500W/24520W/24540W/24560W/24580W/24600W/24620W/24640W/24660W/24680W/24700W/24720W/24740W/24760W/24780W/24800W/24820W/24840W/24860W/24880W/24900W/24920W/24940W/24960W/24980W/25000W/25020W/25040W/25060W/25080W/25100W/25120W/25140W/25160W/25180W/25200W/25220W/25240W/25260W/25280W/25300W/25320W/25340W/25360W/25380W/25400W/25420W/25440W/25460W/25480W/25500W/25520W/25540W/25560W/25580W/25600W/25620W/25640W/25660W/25680W/25700W/25720W/25740W/25760W/25780W/25800W/25820W/25840W/25860W/25880W/25900W/25920W/25940W/25960W/25980W/26000W/26020W/26040W/26060W/26080W/26100W/26120W/26140W/26160W/26180W/26200W/26220W/26240W/26260W/26280W/26300W/26320W/26340W/26360W/26380W/26400W/26420W/26440W/26460W/26480W/26500W/26520W/26540W/26560W/26580W/26600W/26620W/26640W/26660W/26680W/26700W/26720W/26740W/26760W/26780W/26800W/26820W/26840W/26860W/26880W/26900W/26920W/26940W/26960W/26980W/27000W/27020W/27040W/27060W/27080W/27100W/27120W/27140W/27160W/27180W/27200W/27220W/27240W/27260W/27280W/27300W/27320W/27340W/27360W/27380W/27400W/27420W/27440W/27460W/27480W/27500W/27520W/27540W/27560W/27580W/27600W/27620W/27640W/27660W/27680W/27700W/27720W/27740W/27760W/27780W/27800W/27820W/27840W/27860W/27880W/27900W/27920W/27940W/27960W/27980W/28000W/28020W/28040W/28060W/28080W/28100W/28120W/28140W/28160W/28180W/28200W/28220W/28240W/28260W/28280W/28300W/28320W/28340W/28360W/28380W/28400W/28420W/28440W/28460W/28480W/28500W/28520W/28540W/28560W/28580W/28600W/28620W/28640W/28660W/28680W/28700W/28720W/28740W/28760W/28780W/28800W/28820W/28840W/28860W/28880W/28900W/28920W/28940W/28960W/28980W/29000W/29020W/29040W/29060W/29080W/29100W/29120W/29140W/29160W/29180W/29200W/29220W/29240W/29260W/29280W/29300W/29320W/29340W/29360W/29380W/29400W/29420W/29440W/29460W/29480W/29500W/29520W/29540W/29560W/29580W/29600W/29620W/29640W/29660W/29680W/29700W/29720W/29740W/29760W/29780W/29800W/29820W/29840W/29860W/29880W/29900W/29920W/29940W/29960W/29980W/30000W/30020W/30040W/30060W/30080W/30100W/30120W/30140W/30160W/30180W/30200W/30220W/30240W/30260W/30280W/30300W/30320W/30340W/30360W/30380W/30400W/30420W/30440W/30460W/30480W/30500W/30520W/30540W/30560W/30580W/30600W/30620W/30640W/30660W/30680W/30700W/30720W/30740W/30760W/30780W/30800W/30820W/30840W/30860W/30880W/30900W/30920W/30940W/30960W/30980W/31000W/31020W/31040W/31060W/31080W/31100W/31120W/31140W/31160W/31180W/31200W/31220W/31240W/31260W/31280W/31300W/31320W/31340W/31360W/31380W/31400W/31420W/31440W/31460W/31480W/31500W/31520W/31540W/31560W/31580W/31600W/31620W/31640W/31660W/31680W/31700W/31720W/31740W/31760W/31780W/31800W/31820W/31840W/31860W/31880W/31900W/31920W/31940W/31960W/31980W/32000W/32020W/32040W/32060W/32080W/32100W/32120W/32140W/32160W/32180W/32200W/32220W/32240W/32260W/32280W/32300W/32320W/32340W/32360W/32380W/32400W/32420W/32440W/32460W/32480W/32500W/32520W/32540W/32560W/32580W/32600W/32620W/32640W/32660W/32680W/32700W/32720W/32740W/32760W/32780W/32800W/32820W/32840W/32860W/32880W/32900W/32920W/32940W/32960W/32980W/33000W/33020W/33040W/33060W/33080W/33100W

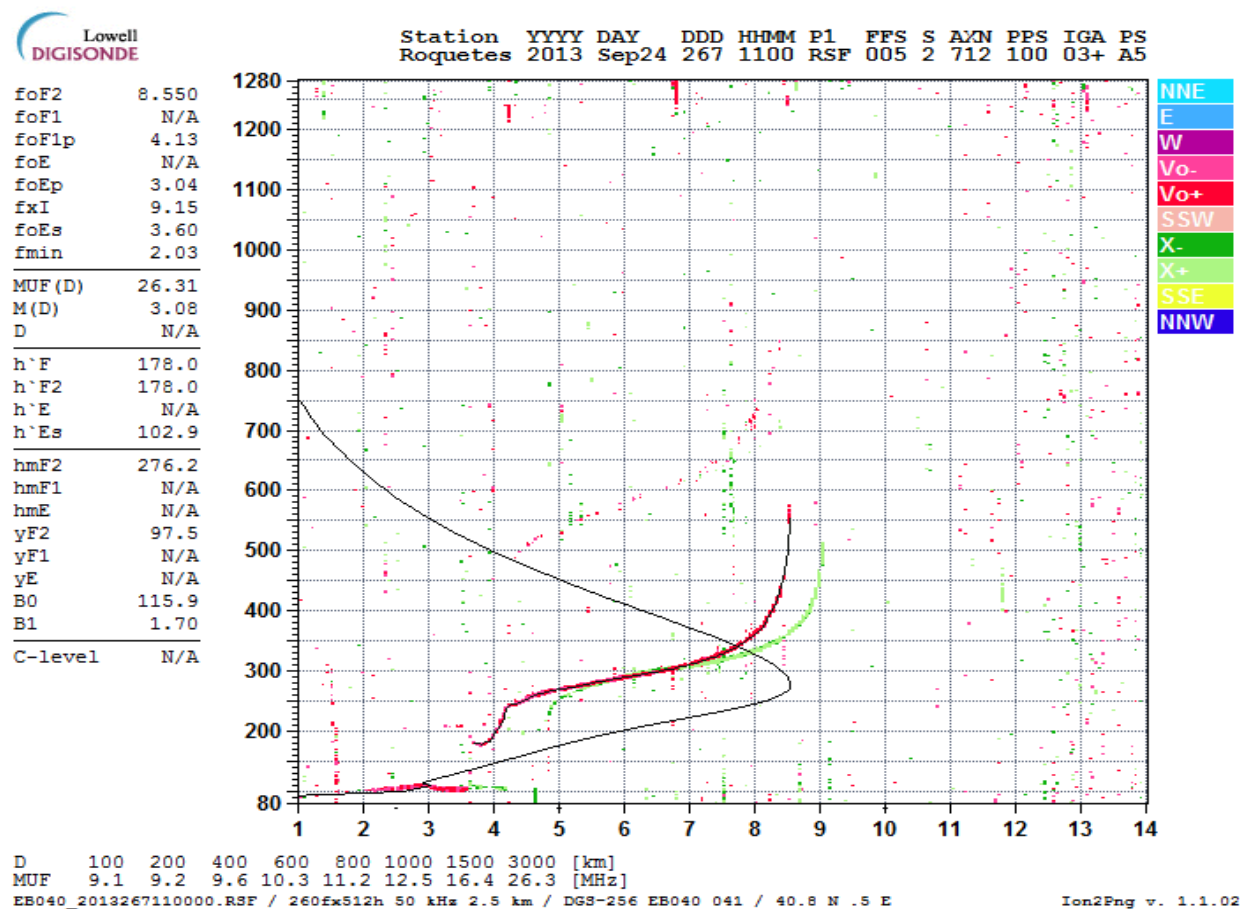
ANEXO 4

Ionogramas referentes ao dia dos ensaios, 24 de Setembro de 2013, medidos entre as 10 UTC e as 14 UTC, acedidos em <http://www.obsebre.es/php/ionosfera/revisats.php>.



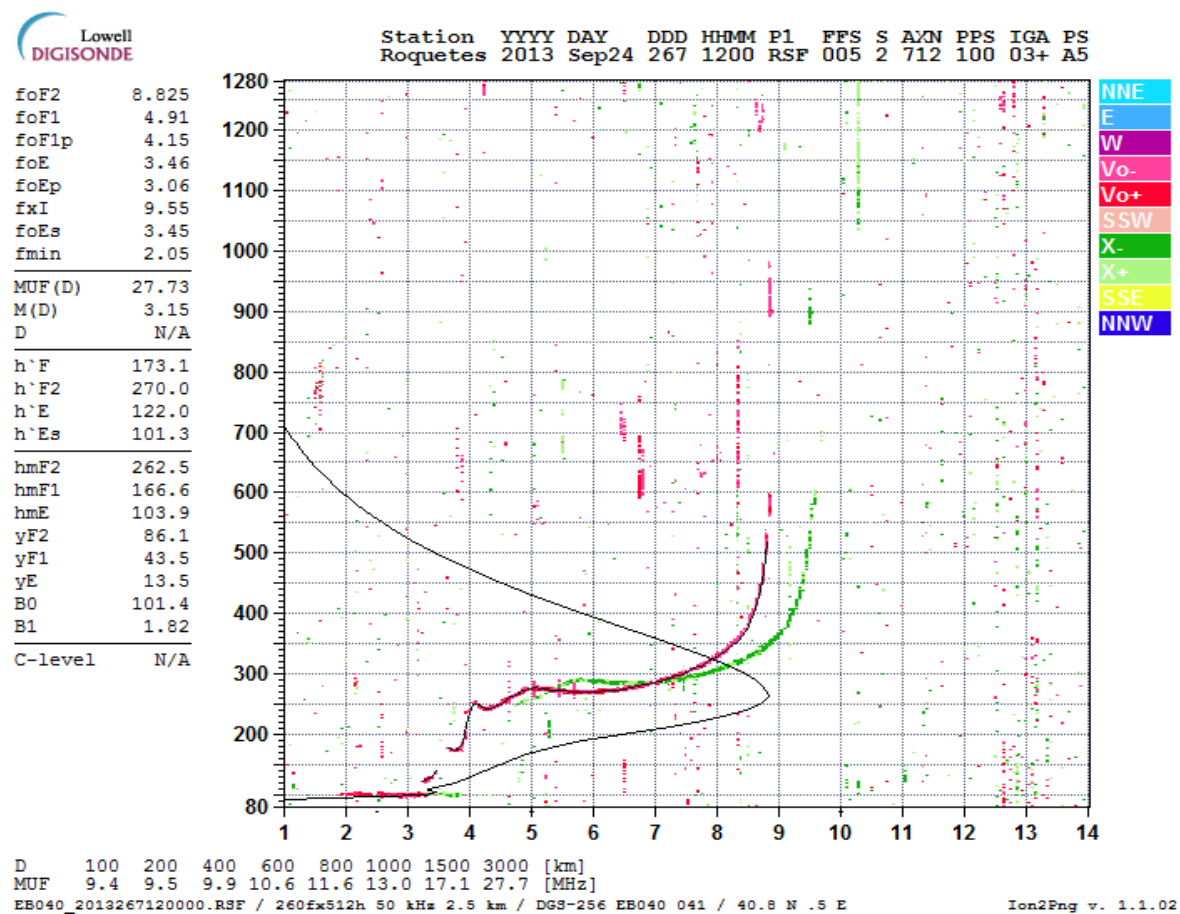
Ionograma 10 UTC

ANEXO 4 (continuação)



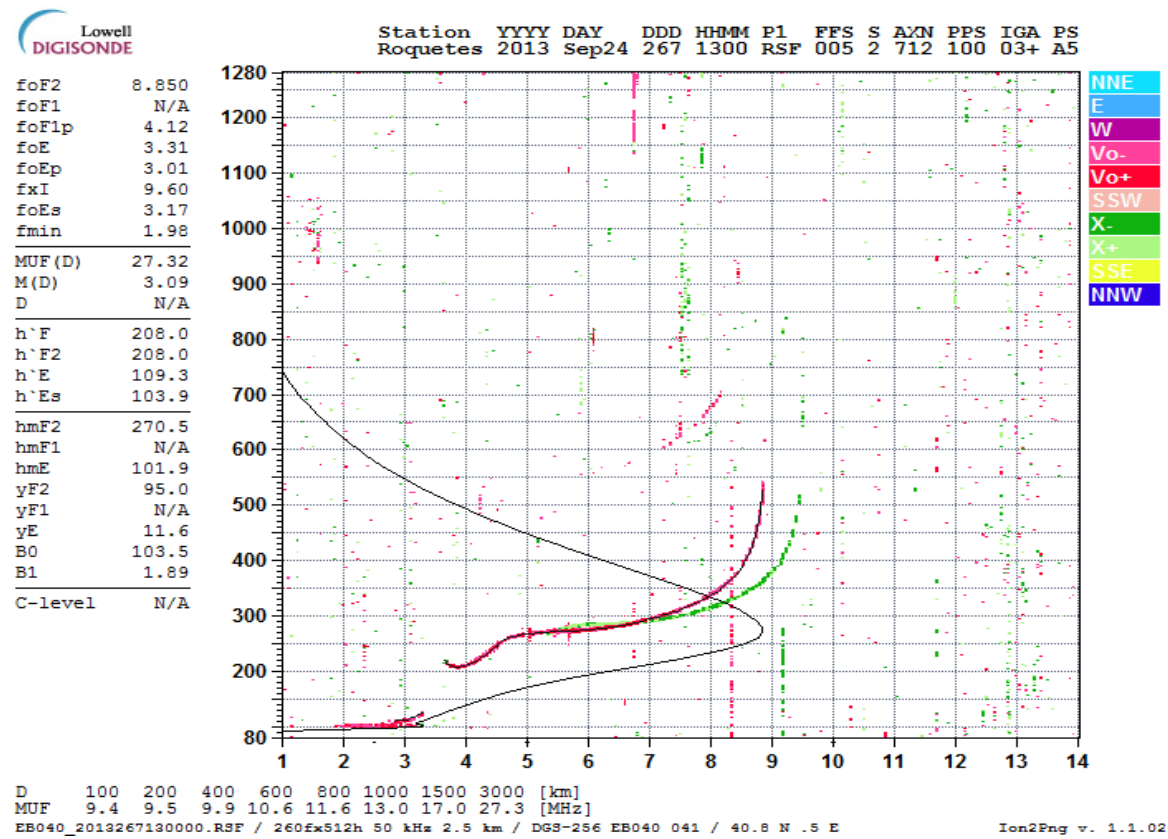
Ionograma 11 UTC

ANEXO 4 (continuação)



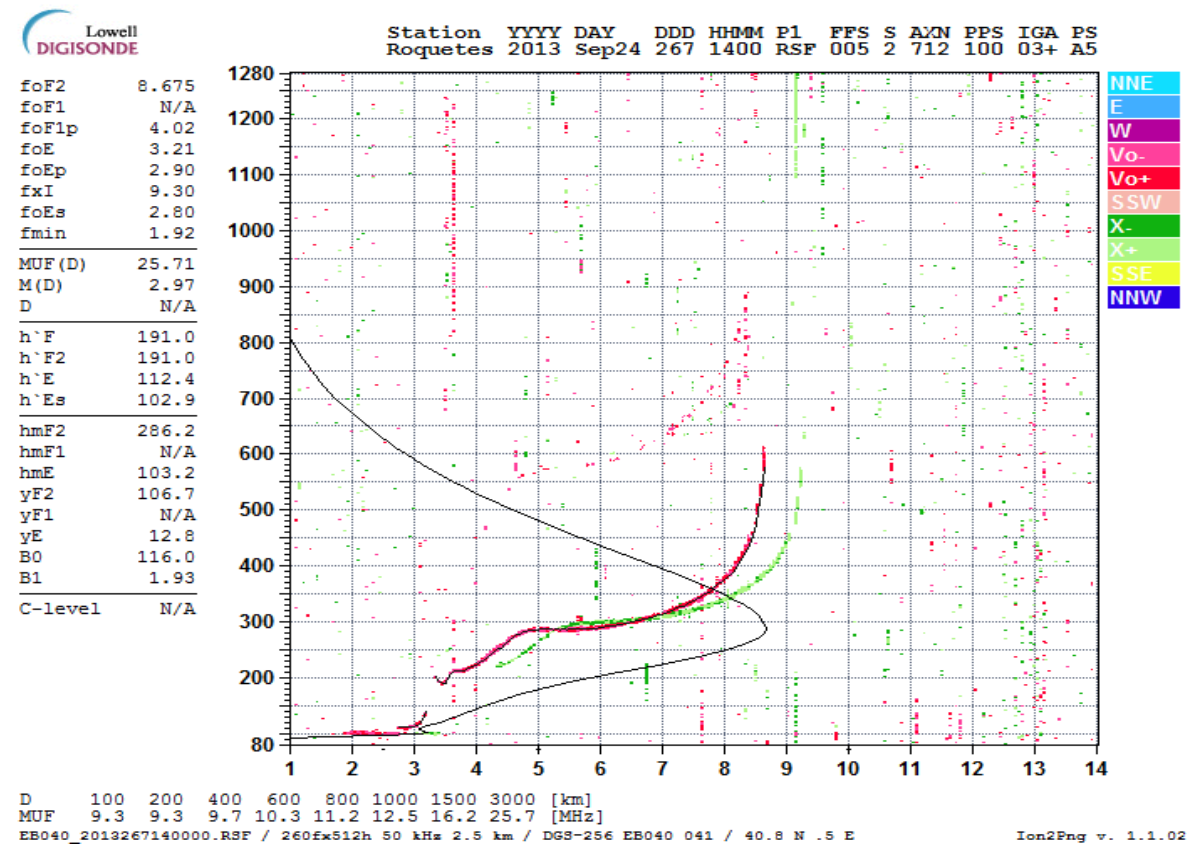
Ionograma 12 UTC

ANEXO 4 (continuação)



Ionograma 13 UTC

ANEXO 4 (continuação)



Ionograma 14 UTC

ANEXO 5

O que será?? Ainda não sei!